

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUISA ROMANÓ SARTOR GUIMARÃES

**ESTUDO SOBRE O COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE
VERTEDOUROS LABIRINTO**

CURITIBA

2011

LUISA ROMANÓ SARTOR GUIMARÃES

**ESTUDO SOBRE O COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE
VERTEDOUROS LABIRINTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Área de Concentração em Engenharia de Recursos Hídricos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos.

Orientador: José Junji Ota

Co-Orientador: André Luiz Tonso Fabiani

CURITIBA

2011

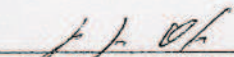
TERMO DE APROVAÇÃO

LUISA ROMANÓ SARTOR GUIMARÃES

“ESTUDO SOBRE O COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE VERTEDOUROS LABIRINTO”

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:


José Junji Ota

Universidade Federal do Paraná
Orientador

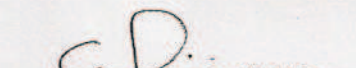
MEMBROS:


Ana Inês Borri Genovez

Universidade Estadual de Campinas

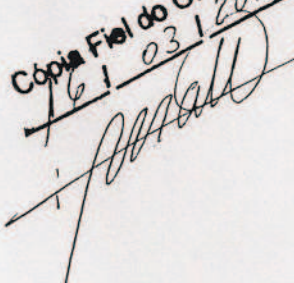

André Luiz Tonso Fabiani

Universidade Federal do Paraná


Miriam Rita Moro Mine

Universidade Federal do Paraná



Cópia Fiel do Original
16/03/2011


Curitiba, 25 de fevereiro de 2011

Ao meu avô, ao meu pai e ao meu marido. Engenheiros e inspiradores da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Foram muitos aqueles que me ajudaram no desenvolvimento desse projeto de pesquisa.

Inicialmente agradeço à Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela oportunidade de estudo e pelo incentivo a pesquisa científica.

Ao meu mestre, orientador e amigo Prof. José Junji Ota, por todo esforço, incentivo e dedicação. Agradeço e me orgulho da oportunidade de ser sua orientada.

Ao meu co-orientador Prof. André Fabiani que esteve sempre ao meu lado e que me auxiliou ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores do PPGERHA pelos ensinamentos e por compartilharem suas experiências técnicas e pessoais durante todas as aulas.

Ao Prof. Cristovão Fernandes por tanto me incentivar a realizar o mestrado.

À Coordenadora Prof. Miriam Mine pelo seu empenho e dedicação ao programa.

À Prof. Ana Genovez por se dispor a participar da banca examinadora, contribuindo muito para o resultado final do trabalho.

Ao LACTEC e a COPEL pela oportunidade de realizar a pesquisa e o estudo experimental através do P&D Aneel. Esse trabalho não seria possível sem o suporte financeiro e o incentivo dado.

Ao Eng. Nelson Saks pelos importantes comentários e sugestões dadas durante o desenvolvimento do estudo

A todos os colaboradores do CEHPAR que de alguma forma participaram dessa pesquisa.

Ao Iverson, amigo fiel e querido, por toda ajuda e atenção dada a mim e ao “nosso” projeto desde os meus primeiros dias como bolsista.

Aos queridos amigos da minha eterna sala.

Aos funcionários da oficina pela ajuda e dedicação.

Aos todos os estagiários, em especial ao Danilo, pelo apoio diário na execução dos testes, e à Claudia, pela ajuda no desenvolvimento da planilha.

Agradeço também a todos os colegas do programa, principalmente aos meus queridos companheiros nas disciplinas de Recursos Hídricos, em especial a minha eterna amiga Lara, pela parceria e ajuda em todos os momentos do mestrado e da minha vida.

Ao pessoal da Intertechne Consultores S.A pelo auxílio e incentivo na fase final da pesquisa.

A toda minha família que participou tão ativamente de todos os momentos da minha formação, sempre acreditando em mim.

Às minhas lindas e quase gêmeas irmãs. Em especial à minha anjinha pelo seu carinho e amor comigo, e por deixar nossas vidas tão mais felizes e bonitas.

Ao meu marido e melhor amigo Pedro, pelo amor e companheirismo e pela lealdade e paciência. Obrigada por você existir.

Aos meus pais Roberto e Angela, que eu tanto amo, pela dedicação eterna, pelo incentivo e amor incondicional dado a mim, me segurando no colo nos momentos em que perdi meu chão.

E finalmente agradeço a Deus, por abençoar e iluminar todos os dias da minha vida.

SUMÁRIO

	PÁG
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1 CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
1.2 Justificativa	2
1.3 Estrutura do Trabalho.....	4
2 CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Primeiros Estudos	5
2.2 Características Geométricas	5
2.2.1 Forma da Crista.....	6
2.2.2 Perfil da Crista.....	9
2.3 Parâmetros de Projeto	14
2.4 Características do Escoamento.....	25
2.5 Interferência da Lâmina Vertente	26
2.6 Aeração e Araste de Ar	28
2.7 Oscilação da Lâmina Vertente	38
2.8 Canal de Descarga e Submersão.....	39
2.9 Sedimentação	42
2.10 Dissipação de Energia	43
2.11 Vertedouros Labirinto Existentes.....	45
3 CAPÍTULO III – ANÁLISE CRÍTICA: CASO PILOTO – PCH BOCAIÚVA	50
3.1 Dimensões e Características do Vertedouro	50
3.2 Considerações a Respeito do Vertedouro Labirinto da PCH Bocaiúva.....	58
4 CAPÍTULO IV: ESTUDOS EM CANAL PRISMÁTICO RETANGULAR.....	59
4.1 Alternativas de Perfil de Crista	59
4.1.1 Crista Retilínea – Perfil Plano	62

4.1.2	Crista Retilínea – Perfil Chanfrado.....	65
4.1.3	Crista Retilínea – Perfil WES Adaptado.....	68
4.1.4	Crista Retilínea – Perfil Quarto de Circunferência.....	70
4.1.5	Estudo Comparativo – Crista Retilínea	72
4.1.5.1	Análise dos Resultados	72
4.1.5.2	Considerações a Respeito do Perfil da Crista	74
4.2	Estudo Comparativo entre uma Soleira Retilínea e em Labirinto.....	75
4.2.1	Crista em Labirinto – Perfil Quarto de Circunferência	76
4.2.2	Estudo comparativo – Crista Retilínea x Crista em Labirinto.....	81
5	CAPÍTULO V: ESTUDO EM MODELO REDUZIDO TRIDIMENSIONAL	83
5.1	Determinação das Alternativas de Layout da Crista em Labirinto.....	83
5.1.1	Método Desenvolvido para o Projeto de Vertedouros Labirinto	83
5.1.2	Alternativas Avaliadas	85
5.1.3	Construção das alternativas propostas em modelo reduzido	87
5.2	Resultados	94
5.2.1	Caso Piloto – Vertedouro Labirinto da PCH Bocaiúva	94
5.2.2	Alternativa 1 – Vertedouro Labirinto com N = 3 ciclos.....	97
5.2.3	Alternativa 2 – Vertedouro Labirinto com N = 6 ciclos.....	101
5.2.4	Alternativa 3 – Vertedouro Labirinto com N = 9 ciclos.....	104
5.2.5	Alternativa 4 – Vertedouro Labirinto com N = 12 ciclos.....	107
5.2.6	Considerações a respeito do estudo de alternativas de layout da crista	110
5.2.7	Alternativa 5 – Vertedouro Labirinto com N = 6 ciclos sem base a jusante	113
5.2.8	Comparação entre os resultados experimentais e teóricos.....	118
6	CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	122
7	CAPÍTULO VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125

LISTA DE FIGURAS

	PÁG
FIGURA 2.1 – Formas da crista de vertedouros labirinto.....	6
FIGURA 2.2 – <i>Layout</i> proposto por TULLIS <i>et al.</i> (1995).....	6
FIGURA 2.3 – Perfis de crista apresentados por FALVEY (2003).....	9
FIGURA 2.4 – Condições do escoamento em cristas com perfil meia circunferência, apresentadas por FALVEY (2003).....	11
FIGURA 2.5 – Coeficientes de descarga para o escoamento em condições atmosféricas proposto por AMANIAN (1987), APUD FALVEY (2003).....	12
FIGURA 2.6 – Coeficientes de descarga para o escoamento em condições SUBatmosféricas proposto por AMANIAN (1987), APUD FALVEY (2003).....	12
FIGURA 2.7 – Coeficientes de descarga para cristas com perfil em ogiva apresentados por FALVEY (2003).	13
FIGURA 2.8 – Perfil do tipo WES proposto por MAGALHÃES (1989).	14
FIGURA 2.9 – Comparação dos valores de C_w calculados segundo DARVAS (1971), MAGALHÃES E LORENA (1989), LUX E HINCHLIFF (1985) E TULLIS <i>et al.</i> (1995) – apresentado por LOPES <i>et al.</i> (2006a).....	18
FIGURA 2.10 – Coeficientes de descarga de vertedouros labirinto, em função do ângulo α e da relação H/P , segundo TULLIS <i>et al.</i> (1995).	19
FIGURA 2.11 – Locação e orientação do vertedouro labirinto proposta por HOUSTON (1983), APUD FALVEY (2003).	23
FIGURA 2.12 – <i>Layout</i> proposto por MELO <i>et al.</i> (2002) para vertedouros labirinto com apenas um ciclo.	24
FIGURA 2.13 – Representação gráfica da variação do parâmetro de convergência dos muros (k_θ) apresentada por MELO <i>et al.</i> (2002).....	25
FIGURA 2.14 – Interferência da lâmina vertente em vertedouros labirinto proposta por INDLEOKOFER e ROUVÉ (1975), <i>apud</i> FALVEY (2003).....	27
FIGURA 2.15 – Representação gráfica dos efeitos da interferência em vertedouros labirinto proposta por FALVEY (2003).	28
FIGURA 2.16 – Comparação da Eficiência de Aeração em cada estrutura, em função da vazão, proposta por WORMLEATON e TSANG (2000).....	31
FIGURA 2.17 – Quatro tipos de impacto do jato na bacia receptora de jusante propostos por TSANG (1987), <i>apud</i> FALVEY (2003).	32
FIGURA 2.18 – Ilustração do comportamento dos jatos, em um vertedouro linear e em um vertedouro labirinto triangular, apresentado por EMIROGLU e BAYLAR (2005).	33
FIGURA 2.19 – Definição dos parâmetros de vertedouros labirinto triangulares apresentado por EMIROGLU e BAYLAR (2005).	34

FIGURA 2.20 – Representação conceitual, do vertedouro labirinto operando com pequena carga, do projeto desenvolvido para Barragem de Brazos, apresentado por TULLIS <i>et al.</i> (2005).	36
FIGURA 2.21 – Representação dos perfis de crista utilizados no estudo experimental. ilustrações e definições das condições da lâmina vertente, apresentada por TULLIS <i>et al.</i> (2005).	36
FIGURA 2.22 – Parâmetros definidos por TULLIS <i>et al.</i> (2007) para as condições de escoamento livre e submerso.	41
FIGURA 2.23 – Análise da energia específica residual em vertedouros labirinto, apresentada por LOPES <i>et al.</i> (2006b).	44
FIGURA 2.24 – Vvertedouro labirinto da Barragem Juturnaíba(RJ). Fonte: Google™ Earth..	47
FIGURA 2.25 – Vvertedouro Labirinto da Barragem Rosário (CE). Fonte: Google™ Earth. ..	48
FIGURA 2.26 – Vista do lago da Barragem Pacajus (CE), o vertedouro labirinto encontra-se na margem esquerda.	48
FIGURA 2.27 – Vista do vertedouro de Pacajus (CE) e do canal de restituição a jusante. ..	49
FIGURA 2.28 – Vvertedouro labirinto da PCH Bocaiúva (MT). Fonte: DM Construtora de Obras Ltda.....	49
FIGURA 3.1 – Principais dimensões do Vvertedouro Labirinto projetado.	51
FIGURA 3.2 – Perfil da crista do Vvertedouro Labirinto projetado para PCH Bocaiúva.	56
FIGURA 3.3 – Ábaco desenvolvido por MAGALHÃES e LORENA (1989) para estimar o coeficiente de descarga em vertedouros labirinto com crista em perfil tipo WES.	57
FIGURA 4.1 – Canal do Laboratório Didático de Hidráulica utilizado nos ensaios experimentais.	60
FIGURA 4.2 – Perfis de crista utilizados nos testes.	60
FIGURA 4.3 – Croqui da instalação dos testes realizados no canal do laboratório (desenho em m).	61
FIGURA 4.4 – Comparação das curvas do coeficiente de descarga observadas nos testes realizados no perfil plano.	64
FIGURA 4.5 – Perfil Plano – Q=2,13 l/s ($H_t=2,00\text{cm}$) – Condição Pressurizada.	64
FIGURA 4.6 – Perfil Plano: Q=27,80 l/s ($H_t=10,00\text{cm}$) – Condição Não Aerada / Q=27,80 l/s ($H_t=10,97\text{cm}$) – Condição Aerada com tubo para ventilação.	65
FIGURA 4.7 – Comparação das curvas do coeficiente de descarga observadas nos testes realizados no perfil chanfrado.	66
FIGURA 4.8 – Detalhe do desenvolvimento de pressão negativa na parte superior da crista com perfil chanfrado / após a colocação de um tubo para aeração ($H_t/P = 0,1$)..	67

FIGURA 4.9 – Perfil Chanfrado: $Q=26,60$ l/s ($H_t=10,00\text{cm}$) – Condição Não Aerada / $Q=26,60$ l/s ($H_t=10,77\text{cm}$) – Condição Aerada com tubo para aeração.	68
FIGURA 4.10 – Comparação das curvas do coeficiente de descarga observadas nos testes realizados no perfil WES adaptado.....	69
FIGURA 4.11 – Perfil WES: $Q=20,45$ l/s ($H=8,00\text{cm}$) – Condição Não Aerada / $Q=20,45$ l/s ($H=8,23\text{cm}$) – Condição Aerada com tubo para aeração.	70
FIGURA 4.12 – Comparação das curvas do coeficiente de descarga observadas nos testes realizados no perfil quarto de circunferência.....	71
FIGURA 4.13 – Perfil quarto de circunferência – $Q=29,45$ l/s ($H=10,00\text{cm}$) – Condição Não Aerada / $Q=29,45$ l/s ($H=10,35\text{cm}$) – Condição Aerada com tubo para aeração.	72
FIGURA 4.14 – Comparação dos coeficientes de descarga observados em cada perfil, analisado na condição aerada.....	73
FIGURA 4.15 – Comparação dos coeficientes de descarga observados em cada perfil, analisado na condição não aerada.	73
FIGURA 4.16 – <i>Layout</i> da crista em labirinto com um ciclo estudada (planta).....	75
FIGURA 4.17 – Comparação dos coeficientes de descarga observados na crista em labirinto com um ciclo e perfil quarto de circunferência.	78
FIGURA 4.18 – Comparação dos resultados apresentados no quadro 4.8, com os coeficientes de descarga teóricos para estruturas com α igual a 20° , interpolados das curvas apresentadas por TULLIS <i>et al.</i> (1995).....	79
FIGURA 4.19 – Configuração em planta da crista em labirinto piloto.....	80
FIGURA 4.20 – Estrutura em Labirinto com 1 ciclo – $Q=30,30$ l/s ($H=8,00\text{cm}$) - Condição Não Aerada.	80
FIGURA 4.21 – Estrutura em Labirinto com 1 ciclo – $Q=30,30$ l/s ($H=8,36\text{cm}$) - Condição Aerada com tubo para aeração.	80
FIGURA 4.22 – Comparação da curva de descarga verificada nos vertedouros com crista retilínea e em labirinto com um ciclo.....	81
FIGURA 4.23 – Comparação dos coeficientes de descarga verificada nos vertedouros com crista retilínea e em labirinto com um ciclo.	82
FIGURA 5.1 – Tela para informação dos dados de entrada.....	84
FIGURA 5.2 – Representação das quatro propostas de <i>layout</i> construídas em modelo reduzido.	87
FIGURA 5.3 – Representação do perfil da crista em labirinto, suas dimensões e grandezas do escoamento.....	89
FIGURA 5.4 – Configuração geral do modelo reduzido.	90
FIGURA 5.5 – Modelo reduzido da alternativa com $N = 3$ ciclos.....	91
FIGURA 5.6 – Modelo reduzido da alternativa com $N = 6$ ciclos.....	92

FIGURA 5.7 – Modelo reduzido da alternativa com $N = 9$ ciclos.....	92
FIGURA 5.8 – Modelo reduzido da alternativa com $N = 12$ ciclos.....	93
FIGURA 5.9 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto da pch bocaiúva.	93
FIGURA 5.10 – Curva do coeficiente de descarga observado nos testes realizados em modelo reduzido – caso piloto.	95
FIGURA 5.11 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto do caso piloto – escoamento instável causado pela forte turbulência de jusante ($H_t/p = 0,646$).	95
FIGURA 5.12 – Modelo Reduzido do vertedouro labirinto do caso piloto – Escoamento com Rabos de galo bem definidos ($(H_t/P = 0,187)$).	96
FIGURA 5.13 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto do caso piloto – Ar incorporado no escoamento devido a intensidade do jato efluente ($H_t/P = 0,592$).....	97
FIGURA 5.14 – curva do coeficiente de descarga observado nos testes realizados em modelo reduzido – $N = 3$ ciclos.....	98
FIGURA 5.15 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto $N = 3$ ciclos – escoamento utilizando praticamente todo o comprimento da crista ($H_t/P = 0,477$).....	100
FIGURA 5.16 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto $N = 3$ ciclos – escoamento praticamente afogado ($H_t/P = 0,443$).	100
FIGURA 5.17 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto $N = 3$ ciclos – escoamento totalmente afogado ($H_t/P = 0,521$).	101
FIGURA 5.18 – curva do coeficiente de descarga observado nos testes realizados em modelo reduzido – $N = 6$ ciclos.....	102
FIGURA 5.19 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto $N = 6$ ciclos – rabos de galo simétricos ($H_t/P = 0,307$).	103
FIGURA 5.20 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto $N = 6$ ciclos – instabilidade e oscilação do jato efluente ($H_t/P = 0,341$).	103
FIGURA 5.21 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto $N = 6$ ciclos – instabilidade e oscilação do jato efluente ($H_t/P = 0,341$).	104
FIGURA 5.22 – curva do coeficiente de descarga observado nos testes realizados em modelo reduzido – $N = 9$ ciclos.....	105
FIGURA 5.23 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto $N = 9$ ciclos – instabilidade da lâmina vertente ($H_t/P = 0,307$).	106
FIGURA 5.24 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto $N = 9$ ciclos – Perda considerável de comprimento efetivo devido a geometria da crista para altos valores da relação H_t/P ($H_t/P = 0,613$).	106
FIGURA 5.25 – curva do coeficiente de descarga observado nos testes realizados em modelo reduzido – $N = 12$ ciclos.....	108

FIGURA 5.26 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto N = 12 ciclos – escoamento calmo e totalmente aerado ($H_t/P = 0,183$).....	109
FIGURA 5.27 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto N = 12 ciclos – Ar incorporado no escoamento devido a intensidade do jato efluente ($H_t/P = 0,591$).....	110
FIGURA 5.28 – Coeficientes de descarga observados nos testes realizados em modelo reduzido.	111
FIGURA 5.29 – representação nova propostas de <i>layout</i> para a estrutura com seis ciclos, sem a base de jusante.	112
FIGURA 5.30 – modelo reduzido da nova alternativa com N = 6 ciclos sem base de jusante.	112
FIGURA 5.31 – Curva do coeficiente de descarga observado nos testes realizados em modelo reduzido – N = 6 ciclos sem base a jusante.	113
FIGURA 5.32 – Comparação das curvas dos coeficientes de descarga observados nos testes realizados em modelo reduzido com seis ciclos – Com a base original e sem base a jusante.	114
FIGURA 5.33 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto N = 6 ciclos modificado – Jato efluente colado na parede do vertedouro ($H_t/P = 0,120$).....	115
FIGURA 5.34 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto N = 6 ciclos original – Jato efluente aerado ($H_t/P = 0,129$).	115
FIGURA 5.35 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto N = 6 ciclos modificado – Jato efluente aerado ($H_t/P=0,579$).....	116
FIGURA 5.36 – Modelo reduzido do vertedouro labirinto N = 6 ciclos modificado – Início da interferência da lâmina vertente ($H_t/P=0,33$).....	117
FIGURA 5.37 – Comparação das curvas dos coeficientes de descarga observados em todas as alternativas avaliadas.	117
FIGURA 5.38 – Comparação das curvas de descarga experimental e teórica – N = 3 ciclos e $\alpha = 30^\circ$	120
FIGURA 5.39 – Comparação das curvas de descarga experimental e teórica – N = 6 ciclos e $\alpha = 28^\circ$	120
FIGURA 5.40 – Comparação das curvas de descarga experimental e teórica – N =9 ciclos e $\alpha = 26^\circ$	121
FIGURA 5.41 – Comparação das curvas de descarga experimental e teórica – N =12 ciclos e $\alpha = 24^\circ$	121

LISTA DE TABELAS

PÁG

TABELA 2.1 – Planilha de cálculo proposta para o projeto de um vertedouro labirinto proposta por TULLIS <i>et al.</i> (1995).	21
TABELA 2.2 – Vertedouros Labirinto mencionados pela literatura (FALVEY, 2003).....	46
TABELA 2.3 – Vertedouros Labirinto não mencionados pela literatura (FALVEY, 2003). ...	47
TABELA 3.1 – Dados dos testes realizados.....	52
TABELA 3.2 – Eficiência do Vertedouro Labirinto da PCH Bocaiúva em função da relação H_t/P	55
TABELA 3.3 – Parâmetro L_{de}/L_1 em função da carga H_t	58
TABELA 4.1 – Cargas impostas 50 cm a montante da crista.	62
TABELA 4.2 – Resultados dos testes realizados no perfil plano, sem tubo de aeração.	63
TABELA 4.3 – Resultados dos testes realizados no perfil plano, com tubo de aeração.	63
TABELA 4.4 – Resultados dos testes realizados no perfil chanfrado.	66
TABELA 4.5 – Resultados dos testes realizados no perfil WES adaptado.	68
TABELA 4.6 – Resultados dos testes realizados no perfil quarto de circunferência.	70
TABELA 4.7 – Resultados dos testes realizados na crista em labirinto com um ciclo e perfil quarto de circunferência, sem instrumentos de aeração.....	77
TABELA 4.8 – Resultados dos testes realizados na crista em labirinto com um ciclo e perfil quarto de circunferência, com instrumentos de aeração.....	77
TABELA 4.9 – Eficiência do Vertedouro Labirinto com $N = 1$ ciclo, em função de H_t/P	82
TABELA 5.1 – Propostas de projeto calculadas pelo método desenvolvido.	86
TABELA 5.2 – Resultados dos testes realizados no caso piloto avaliado.....	94
TABELA 5.3 – Resultados dos testes realizados no modelo reduzido com $N = 3$ ciclos.....	98
TABELA 5.4 – Resultados dos testes realizados no modelo reduzido com $N = 6$ ciclos....	101
TABELA 5.5 – Resultados dos testes realizados no modelo reduzido com $N = 9$ ciclos....	104
TABELA 5.6 – Resultados dos testes realizados no modelo reduzido com $N = 12$ ciclos..	107
TABELA 5.7 – Resultados dos testes realizados no modelo reduzido com $N = 6$ ciclos sem base a jusante.	113
TABELA 5.8 – Comparação das vazões teóricas calculadas e as experimentais observadas nos testes em modelo reduzido (para $H_d = 2,00$ m).	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

α	- ângulo formado na direção do escoamento ($^{\circ}$);
$\alpha_{\text{máx}}$	- ângulo máximo formado na direção do escoamento ($^{\circ}$);
A	- lado interno do vértice (m);
B	- comprimento do vertedouro na direção do escoamento (m);
C	- coeficiente de descarga dimensional, calculado em função de L ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$);
C_W	- coeficiente de descarga dimensional, calculado em função de W ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$);
C_d	- coeficiente de descarga adimensional;
D	- lado externo do vértice (m);
E	- eficiência de aeração;
ε	- eficiência do vertedouro labirinto;
ϕ	- inclinação do perfil da crista ($^{\circ}$);
g	- aceleração da gravidade (m/s^2);
λ	- fator de escala geométrica;
λ_Q	- fator escala de vazão;
λ_v	- fator de escala de velocidade;
h	- carga piezométrica (m);
h_c	- altura crítica do escoamento (m);
H_d	- carga de projeto (m);
H_j	- carga total a jusante na condição de escoamento livre (m);
H_{jL}	- energia específica residual a jusante (m);
H_{mL}	- carga hidráulica a montante (m);
H_o	- carga total a montante na condição de escoamento livre (m);
H_t	- carga total sobre a crista (m);
H^*	- carga total em condições de submersão (m);
k	- coeficiente de forma da crista;
k_{θ}	- coeficiente de influência da convergência dos muros laterais;
l	- comprimento de um ciclo da crista (m);
L	- comprimento total (desenvolvimento da crista) do vertedouro labirinto (m);
L_{de}	- comprimento de interferência da lâmina vertente (m);
L_e	- comprimento efetivo do vertedouro labirinto (m);
L_1	- comprimento do braço (m);
L_2	- comprimento efetivo do braço (m);
m	- índice que se refere aos valores de modelo;
N	- número de ciclos;

p	- índice que se refere aos valores de protótipo.
P	- altura da crista (m);
Q	- vazão (m ³ /s);
Q _A	- taxa de arraste de ar (m ³ /s);
Q _L	- vazão correspondente em uma crista em labirinto (m ³ /s);
Q _N	- vazão correspondente em uma crista retilínea (m ³ /s);
R	- raio de curvatura do perfil da crista (m);
t	- espessura da parede da crista (m);
θ	- ângulo formado pelos muros do canal convergente (°);
V _a	- volume de ar arrastado (m ³);
V	- velocidade do escoamento (m/s);
w	- largura de um ciclo da crista (m);
W	- largura total da crista (m);

PCH – Pequena Central Hidrelétrica;

UHE – Usina Hidrelétrica

USBR – *United States Bureau of Reclamation*

UWRL - *Utah Water Research Laboratory*

WES - *Waterways Experiment Station*

RESUMO

A utilização de vertedouros labirinto deverá ser cada vez mais frequente em obras de pequenas e médias usinas hidrelétricas, por apresentar maior capacidade de descarga em relação ao vertedouro convencional, mantendo-se a mesma sobre-elevação.

Observa-se a necessidade da realização de pesquisas que esclareçam a operação de vertedouros labirinto, preenchendo uma lacuna do conhecimento do meio técnico brasileiro. Os projetos atuais procuram viabilizar soluções cada vez mais econômicas, até mesmo lançando mão de formas não convencionais. Torna-se necessário, portanto, obter maiores conhecimentos para diversas alternativas de projeto, identificando eventuais particularidades do escoamento nessas estruturas.

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o comportamento de vertedouros labirinto, tomando como caso piloto o vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva. A partir de uma análise crítica realizada, foram determinadas alternativas de layout da crista do vertedouro que conferem maior eficiência em relação à capacidade de descarga e aeração, sem aumento significativo dos custos.

A revisão da literatura realizada sobre o tema revelou que há um bom material bibliográfico que serve de base para a pesquisa proposta. Entretanto, foi observado também que há lacunas a serem preenchidas em termos de capacidade de descarga.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados em canal prismático retangular, nos quais foram verificados diferentes tipos de perfil da crista e comparados os comportamentos da crista em labirinto frente à crista retilínea, serviram como base para os estudos realizados em modelo reduzido tridimensional.

Apresenta-se uma planilha que calcula as dimensões e principais parâmetros de projeto de vertedouros labirinto, e determina uma vazão teórica baseada no método de TULLIS *et al.* (1995).

Como resultado, selecionam-se os principais parâmetros que devem ser levados em conta no projeto de vertedouros labirinto, baseados nas pesquisas teóricas e na comprovação experimental desse trabalho.

PALAVRAS CHAVES: Vertedouro labirinto, critério de projeto hidráulico, modelo reduzido.

ABSTRACT

The use of labyrinth spillways is expected to be increasingly usual in small and medium-sized hydroelectric power plants due to its higher discharge capacity compared to conventional spillways.

There is a need of further research to clarify the flow pattern of labyrinth spillways, filling a gap in this kind of knowledge of the Brazilian technology. Current projects seek for more and more economical solutions even trying non conventional shapes. Therefore it is necessary to obtain better knowledge for various design alternatives, identifying particular flow characteristics in these stations.

The main aim of this study was to evaluate the behavior of labyrinth spillways and it was taken as case study the labyrinth spillway of Bocaiuva Small Hydroelectric Plant. From a critical analysis it was determined alternative layouts of labyrinth spillway that provide higher efficiency in terms of discharge capacity and flow aeration, without significant additional cost.

A detailed literature review about the topic showed that there is a good bibliographical material which was used as the basis for the proposed research. However, it was observed that there are gaps to be filled in terms of spillway discharge capacity.

Firstly it was carried out tests with different crest profiles in a rectangular flume and then it was done comparison between behaviors of labyrinth and conventional spillways in the same laboratory flume. These test results were used as the basis for subsequent three dimensional model study.

It is presented a spreadsheet that leads to appropriate station dimensions and main design parameters of labyrinth spillways, and provides the possible discharge based on TULLIS *et al.* (1995) method.

As a result, it is pointed out a guide for future designs of labyrinth spillways based on the literature research and on the present experimental study.

KEYWORDS: Labyrinth spillways, hydraulic design criteria, physical model

1 CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Os vertedouros podem ser definidos como uma estrutura hidráulica que possui a principal finalidade de conduzir o escoamento excedente do reservatório de maneira segura, impedindo o galgamento da barragem com a passagem de vazões extremas.

Apesar de ser uma estrutura relativamente simples, os vertedouros possuem grande importância sob o ponto de vista de segurança das barragens e representam uma porcentagem significativa do custo total da obra. A definição do tipo de vertedouro que deverá ser utilizado é uma das principais diretrizes do projeto. A escolha da estrutura adequada deve levar em conta as características e condições físicas, geológicas e hidrológicas do local de sua implantação. .

Uma das principais preocupações dos projetistas é reduzir as dimensões dessa estrutura, sem afetar a segurança da obra. Somado a isso, os projetos de barragens tem sido alvo de crítica por parte dos ambientalistas, em função do tamanho dos reservatórios formados. Sendo assim, é desejável que os aproveitamentos apresentem pequenas alturas, e mínimas ou inexistentes variações de níveis de água no reservatório.

Esta dissertação envolve o estudo da utilização de vertedouros labirinto em usinas hidrelétricas. Essa estrutura possuiu crista com desenvolvimento em planta não linear, composto por um ou mais ciclos, em forma triangular ou trapezoidal. Devido a esta disposição em zig zag, torna-se possível aumentar o comprimento efetivo da seção de escoamento, o que confere a eficiência em escoar grandes fluxos onde a lâmina máxima é limitada a baixos valores. Sendo assim, mesmo para grandes variações de vazão, a geometria da crista do vertedouro labirinto fornece a característica vantajosa de variar pouco o nível de água a montante.

A principal vantagem apresentada por essa estrutura, se comparada aos vertedouros com crista retilínea padrão, é o aumento da capacidade de descarga para uma dada altura e comprimento da crista, ou da capacidade do reservatório através da elevação da crista, mantendo a mesma capacidade do vertedouro.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o comportamento hidráulico de vertedouros labirinto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- 1) Realizar uma vasta revisão bibliográfica sobre o tema, explorando sua vantagem principal que é o aumento da capacidade de descarga mantendo praticamente constante o nível do reservatório;
- 2) Realizar um estudo em modelo reduzido de vertedouro labirinto, variando parâmetros de dimensionamento;
- 3) Realizar testes confrontando o vertedouro convencional e labirinto;
- 4) Aprimorar e divulgar um critério de projeto de vertedouro labirinto, adaptado às necessidades de futuras obras brasileiras;
- 5) Transferir tecnologia através da realização de cursos e artigos para periódicos e/ou simpósios.

1.2 Justificativa

VERNOWK (1982), *apud* AFSHAR (1988), afirma que um terço das falhas ocorridas em barragens são causadas pela falta de capacidade dos vertedouros. Nesse sentido, com o intuito de minimizar essas falhas e reduzir os danos causados pelo galgamento da barragem, pesquisadores têm dado maior atenção ao projeto de vertedouros.

De acordo com AFSHAR (1988) o escoamento das grandes cheias pode ser obtido a partir do aumento do comprimento da crista ou da carga de operação. Em muitos casos o aumento da carga é dado a partir da utilização de vertedouros com comportas, que aumentam significativamente a capacidade de descarga. Nos casos em que a largura da crista e do canal serão reduzidas, o uso de vertedouros com comportas pode gerar uma significativa redução de custos. Entretanto, essas estruturas possuem algumas desvantagens que pode tornar seu uso limitado, incluindo: a necessidade de sistemas de segurança adicionais para garantir sua

operação em casos de emergência; e a perda significativa de água nos casos de aberturas acidentais das comportas, que causam possíveis danos a jusante (cheias artificiais).

CROOKSTON e TULLIS (2008) afirmam que, com a atualização da estimativa de máxima cheia provável (*PMF – Probable Maximum Flood*) para os vertedouros existentes, modificações e substituições vêm sendo cada vez mais necessárias para o aumento da capacidade de descarga dessas estruturas. Nem sempre é possível aumentar a largura do canal vertedor, ou aumentar a elevação do reservatório de superfície para reabilitar uma estrutura já existente, de modo que se enquadre nas novas estimativas da *PMF*. YILDIZ e ÜZÜCEK (1996) também mencionam a necessidade de que os projetos de engenharia proporcionem aos vertedouros maior capacidade de armazenamento e descarga, para que seja garantida a passagem da *PMF* com maior segurança.

Segundo FALVEY (2003), nem sempre é possível aumentar a capacidade da estrutura devido às limitações físicas do canal de aproximação ou do canal de descarga. Nesse contexto, diversas geometrias foram estudadas para aumentar o comprimento efetivo da crista, sem alterar a largura do vertedouro. Devido ao seu formato em zig-zag, a crista em labirinto confere ao vertedouro um maior comprimento efetivo e, conseqüentemente, eleva a sua capacidade.

O U.S. BUREAU OF RECLAMATION (1977) cita que a escolha por uma crista em labirinto é particularmente vantajosa quando a largura do vertedouro é previamente fixada e a elevação do nível de água a montante é restrita, sendo necessária a passagem de grandes vazões. O aumento do comprimento da crista, produzido pela configuração do labirinto, permite a passagem de grandes vazões sob pequenas cargas. Nos casos em que a capacidade do vertedouro existente precisa ser adequada devido ao aumento da vazão de projeto, a estrutura em labirinto é uma excelente alternativa se comparada ao método tradicional de adicionar um novo vertedouro. Vertedouros labirinto também podem ser utilizados como estruturas de controle ou de desvio em canais. Sua utilização também é adequada quando pretende-se aumentar a capacidade de armazenamento. Essas estruturas são mais econômicas do que os vertedouros com comportas, e a economia de recursos pode ser realizada durante a construção inicial e nos custos futuros de operação e manutenção.

TULLIS *et al.* (1995) definem o vertedouro labirinto como uma estrutura que se caracteriza pela sua forma não linear, que apresenta geometria em planta com repetições triangulares ou trapezoidais, gerando um comprimento efetivo maior para uma dada largura do vertedouro. Geralmente, o comprimento total do vertedouro labirinto é de três a cinco vezes maior que a largura do canal em que esta inserido.

1.3 Estrutura do Trabalho

A pesquisa apresentada neste trabalho é desenvolvida em 5 capítulos:

Capítulo I – Introdução: no qual são abordadas as motivações, justificativas e os objetivos do trabalho;

Capítulo II – Revisão Bibliográfica: o capítulo apresenta uma completa revisão da literatura sobre o tema vertedouro labirinto, abordando os principais estudos presentes na bibliografia;

Capítulo III – Análise Crítica: Caso Piloto – PCH Bocaiúva: apresenta a análise crítica realizada, para avaliar a geometria e o comportamento hidráulico do vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva, utilizado nesta pesquisa como caso piloto.

Capítulo IV – Estudos em Canal Prismático Retangular: descreve os procedimentos realizados e apresenta os resultados obtidos nos ensaios em canal prismático retangular, nos quais foi determinado o perfil de crista mais eficiente, em relação à capacidade de descarga, e compara o comportamento de um vertedouro retilíneo convencional frente ao vertedouro labirinto.

Capítulo V – Estudos em Modelo Reduzido Tridimensional: expõe os critérios utilizados no dimensionamento e na construção das estruturas avaliadas em modelo reduzido tridimensional. Apresenta e analisa os resultados obtidos nos testes realizados. Descreve e avalia uma nova proposta para resolver os problemas de aeração do escoamento observados nos testes realizados.

Capítulo VI – Conclusões e Recomendações: relata as conclusões finais obtidas nos estudos realizados e as recomendações para futuros trabalhos.

2 CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Primeiros Estudos

De acordo com GENTILINI (1941), *apud* MAGALHÃES (1983), as primeiras pesquisas relacionadas a esse tipo de estrutura foram realizadas por Boileau (1854), que apresentou um estudo experimental sobre vertedouros com crista disposta obliquamente em relação ao escoamento, e por Aichel (1907) que apresentou o primeiro estudo sistemático sobre essas estruturas. MAGALHÃES (1983) destaca, ainda, outros estudos que visam esclarecer o comportamento de vertedouros labirinto, como Tiso e Fransen (1963), Hay e Taylor (1969, 1970 e 1972) e Darvas (1971).

TAYLOR (1968), *apud* TULLIS *et al.* (1995), realizou uma investigação extensiva em torno do comportamento de vertedouros labirinto. HAY e TAYLOR (1970) apresentaram um procedimento que incluiu critérios para a estimativa de vazões em vertedouros labirinto trapezoidais e triangulares. DARVAS (1971) propôs em seu estudo a utilização de curvas para o dimensionamento dessas estruturas. LUX (1984), *apud* TULLIS *et al.* (1995), avaliou o desempenho hidráulico e desenvolveu uma equação de descarga de vertedouros labirintos.

O *U.S. Bureau of Reclamation* testou modelos de vertedouros labirinto para Barragem Ute e para a Barragem Hyrum, ambas nos Estados Unidos, e seus resultados foram apresentados nos estudos realizados por Houston (1982;1983) e Hinchliff e Houston (1984). Os modelos utilizados por HOUSTON (1983) e LUX (1984), *apud* TULLIS *et al.* (1995), apresentaram algumas discrepâncias em relação àquele publicado por HAY e TAYLOR (1970), no que se refere à definição da carga. Enquanto este último utilizou a carga piezométrica, HOUSTON (1983) e LUX (1984), *apud* TULLIS *et al.* (1995), consideraram a carga total em seus cálculos. O uso da carga piezométrica não leva em conta as diferenças da velocidade de aproximação, e pode gerar erros significantes, pois a carga cinética ($v^2/2g$) pode ser considerável.

2.2 Características Geométricas

De acordo com MAGALHÃES (1983), a crista do vertedouro labirinto é, em geral, constituída por uma série de muros verticais, de pequena espessura, dispostos em planta segundo uma diretriz poligonal, cuja parte superior é circular, ou

tem a forma de um perfil tipo WES (*Waterways Experiment Station*). Normalmente, a espessura da parede da crista é cerca de 0,50 metros, e sua altura pode atingir no máximo 5 metros. A implantação de estruturas com altura superior a este valor não são convenientes, pois necessitam de paredes mais espessas e de lajes de fundo mais resistentes no início do canal a jusante, diminuindo a economia da obra.

2.2.1 Forma da Crista

Em planta, a crista de um vertedouro labirinto pode apresentar a forma triangular, retangular, ou trapezoidal (Figura 2.1). De acordo com FALVEY (2003), o formato trapezoidal é o mais utilizado devido às razões de natureza construtiva e hidráulica.

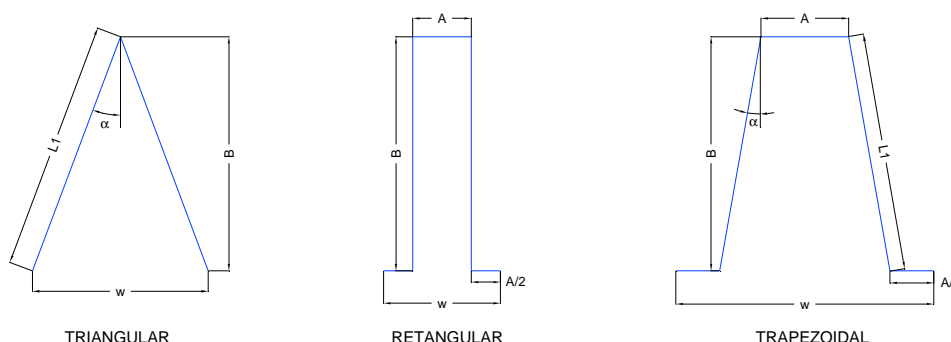


FIGURA 2.1 – FORMAS DA CRISTA DE VERTEDOUROS LABIRINTO.

TULLIS *et al.* (1995) apresentam um *layout* (Figura 2.2) e define as diretrizes gerais dos parâmetros principais do vertedouro labirinto:

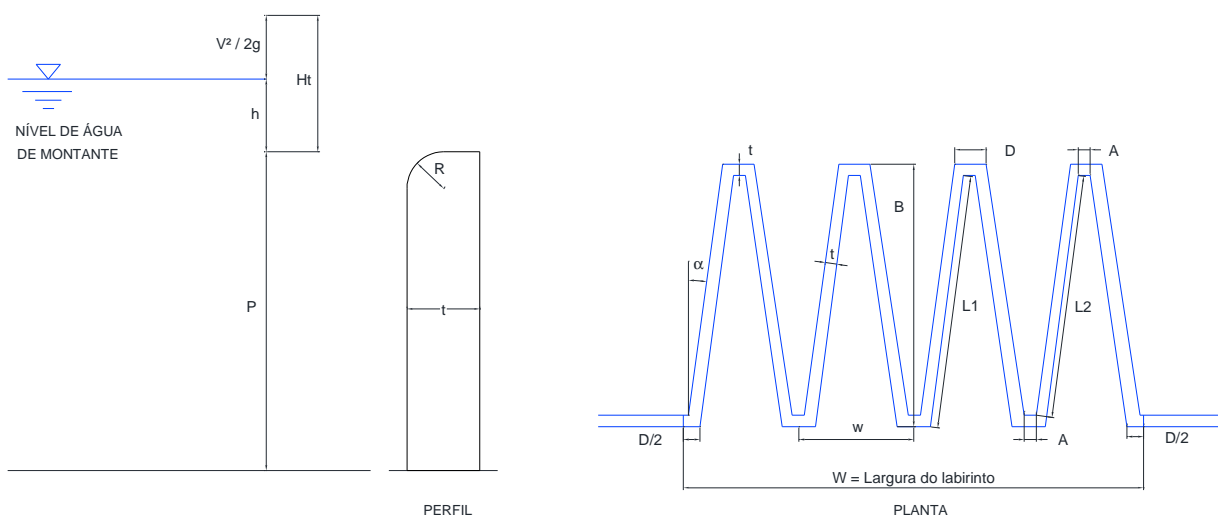


FIGURA 2.2 – LAYOUT PROPOSTO POR TULLIS *et al.* (1995).

Altura do Vertedouro (P): Corresponde a diferença entre a elevação da crista e a elevação da face externa, a montante do vertedouro. Este parâmetro influencia nas perdas de carga do canal de aproximação e na capacidade do vertedouro.

Espessura da parede da crista (t): É determinada a partir de uma análise estrutural que verifica as forças hidráulicas, e depende da altura da crista e das condições específicas do local de implantação da obra. De acordo com a bibliografia, recomenda-se que este parâmetro seja igual a um sexto da altura da crista ($t = P/6$). Se a parede for mais delgada por razões estruturais, resultará em um pequeno efeito sobre a capacidade de descarga. Caso este decréscimo na espessura da parede seja significativo, haverá uma redução correspondente no raio de curvatura da crista, resultando na separação do escoamento e na redução da capacidade de descarga.

Ângulo formado na direção do escoamento (α): É o ângulo formado entre a seção oblíqua ao eixo do canal e o próprio eixo. Pode variar entre 6° a 35° , mas para que se obtenha o máximo comprimento efetivo do vertedouro, garantindo sua eficiência e menor custo, é recomendado que a escolha esteja entre 7° e 16° . Para valores abaixo de 7° e acima de 16° , a largura do vertedouro labirinto (W) aumenta. O comprimento total da crista do vertedouro também é um fator que deve ser considerado na diminuição dos custos. Com o aumento do ângulo α , o comprimento da estrutura diminui, e a redução de custo pode não ser verificada com a diminuição da largura. Valores pequenos de α geram vertedouros com maior capacidade em casos de baixas elevações do reservatório. Essa capacidade aumenta com a diminuição de α , devido ao aumento do comprimento efetivo da crista. Nesse contexto, propõem-se um critério para manter o comprimento e a largura em proporções apropriadas, que relaciona o valor da largura de um ciclo (w) e da altura da crista do vertedouro (P). Segundo TULLIS *et al.* (1995), o parâmetro adimensional w/P deve estar entre os valores três e quatro ($3 \leq w/P \leq 4$).

Lado interno do vértice (A): Deve ser a menor possível, pois pode reduzir a capacidade do vertedouro, já que diminui o comprimento efetivo da crista em labirinto. Este parâmetro deve estar entre uma ou duas vezes a espessura da parede da crista ($t < A < 2t$).

Lado externo do vértice (D): É obtido através da seguinte expressão:

$$D = A + \left[2 \cdot t \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (2.1)$$

Número de ciclos (N): Este parâmetro depende da largura do canal em que o vertedouro se encontra. A escolha tanto do número de ciclos N , quanto do ângulo α , influencia no comprimento, na largura e em outros detalhes do vertedouro. Com completa liberdade para variar esses parâmetros, podem ser criados diversos *layouts*. Após se considerar as limitações específicas da situação da obra, o *layout* mais apropriado para cada caso deve ser determinado através de uma análise econômica e hidráulica.

Comprimento efetivo do vertedouro (L_e): É função do número de ciclos, do lado interno do ápice e do comprimento efetivo do braço do vertedouro:

$$L_e = 2 \cdot N \cdot (A + L_2) \quad (2.2)$$

Comprimento do Vertedouro na direção do escoamento (B): É função do comprimento efetivo (L_e), do número de ciclos (N), do ângulo (α) e da espessura (t):

$$B = \left\{ \frac{L}{2 \cdot N} + \left[t \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \right\} \cdot \cos \alpha + t \quad (2.3)$$

Comprimento do Braço (L_1): É função do comprimento do vertedouro na direção do escoamento (B), da espessura (t) e do ângulo (α):

$$L_1 = \frac{B - t}{\cos \alpha} \quad (2.4)$$

Comprimento Efetivo do Braço (L_2): É função do comprimento do braço (L_1), da espessura (t) e do ângulo (α):

$$L_2 = L_1 - \left[t \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (2.5)$$

Comprimento Total da Crista (L): É função do número de ciclos (N), do comprimento do braço (L_1) e dos lados interno (A) e externo do ápice (D):

$$L = N \cdot [D + A + (2 \cdot L_1)] \quad (2.6)$$

Largura de um ciclo (w): É função do comprimento do braço (L_1), do ângulo (α) e dos lados interno (A) e externo (D) do ápice:

$$w = (2 \cdot L_1 \cdot \sen \alpha) + D + A \quad (2.7)$$

Largura total do canal (W): É função do número de ciclos (N) e da largura desses (w).

$$W = N \cdot w \quad (2.8)$$

Carga sobre a crista (h): Representa a diferença entre o nível de água a montante da crista e a elevação da crista. A carga total (H_t) é a diferença entre o nível de energia a montante da crista e a elevação desta.

$$H_t = h + \frac{u^2}{2g} \quad (2.9)$$

Coeficiente de Descarga (C_d): Nos principais estudos presentes na bibliografia atual sobre vertedouro labirinto, o coeficiente de descarga normal (C) é substituído pelo coeficiente C_d , segundo mostra a equação 2.10

$$C = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot C_d \rightarrow Q = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot C_d \cdot L \cdot H^{1.5} \quad (2.10)$$

2.2.2 Perfil da Crista

FALVEY (2003) apresenta detalhadamente os tipos de perfil de crista utilizada em vertedouros labirinto (Figura 2.3):

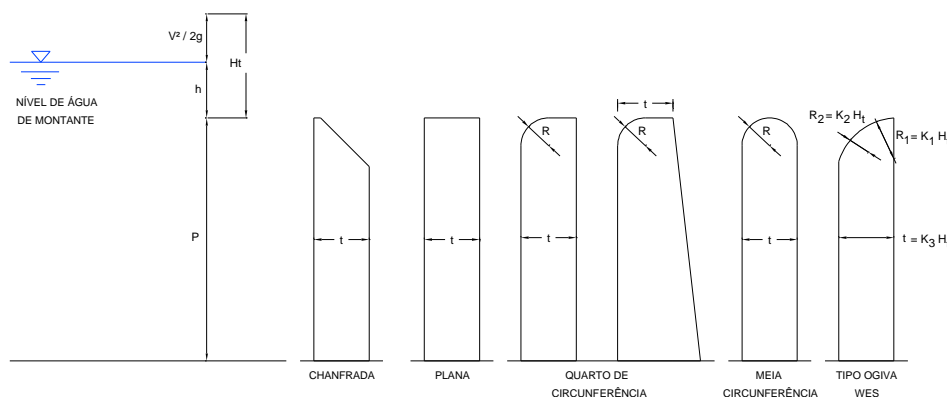


FIGURA 2.3 – PERFIS DE CRISTA APRESENTADOS POR FALVEY (2003).

De acordo com o FALVEY (2003), é muito importante conhecer o comportamento do coeficiente de descarga em cada tipo de perfil da crista, principalmente para estruturas que operam com pequenas cargas. Esses

coeficientes podem ser estimados através das seguintes equações, de acordo com cada tipo de perfil:

Crista plana (“flat top”) e Crista chanfrada (“sharp crest”):

As cristas chanfradas e planas apresentam grande facilidade de construção, entretanto, devido à turbulência no escoamento causada pelo vértice a montante do perfil, o coeficiente de descarga pode ser reduzido. A equação de REHBOCK (1929), *apud* FALVEY (2003), permite determinar o coeficiente C_d :

$$C_d = 0,605 + 0,08 \cdot \frac{h}{P} + \frac{1}{h(mm)} \quad (2.11)$$

Crista com perfil quarto de circunferência (“quarter round”):

Como será apresentado posteriormente, TULLIS *et al.* (1995) desenvolveram um conjunto de equações para o cálculo do coeficiente de descarga nesse tipo de perfil. Além de conferir facilidade na construção, o perfil quarto de circunferência apresenta um coeficiente de descarga superior, se comparado à crista plana ou chanfrada.

Crista com perfil meia circunferência (“half round”):

Segundo FALVEY (2003), o coeficiente de descarga deste perfil é influenciado pelo fluxo na crista, sendo quatro as condições possíveis de escoamento (Figura 2.4): “*pressure*”, atmosférica, subatmosférica e com cavidade (o autor define esta condição como “*cavity*”).

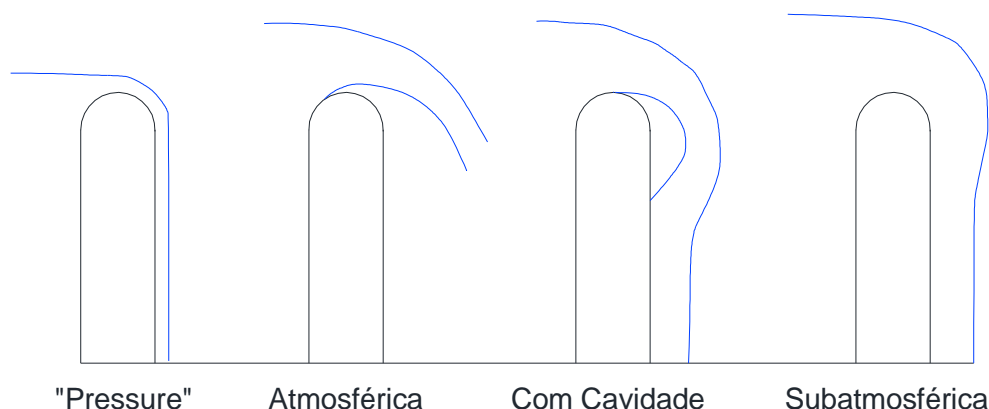


FIGURA 2.4 – CONDIÇÕES DO ESCOAMENTO EM CRISTAS COM PERFIL MEIA CIRCUNFERÊNCIA, APRESENTADAS POR FALVEY (2003).

Segundo o autor, o escoamento denominado como “*pressure*” é análogo ao escoamento em uma crista com perfil tipo ogiva, sendo positiva a pressão ao longo da crista (acima da pressão atmosférica). Com o aumento da lâmina de água sobre a crista, esta se desprende da parede do vertedouro, escoando livremente a jusante e alcança a condição atmosférica. Para cargas maiores, a pressão sobre a crista torna-se subatmosférica. Esta condição depende da aeração da lâmina vertente a jusante. Quando aerada, a pressão torna-se atmosférica e os jatos saltam para fora da crista. A condição subatmosférica ocorre quando a lâmina vertente não é aerada, e adere à face jusante da parede do vertedouro. Entre estas duas condições pode ser observado o escoamento com cavidade, que geralmente é instável.

INDLEOKOFER e ROUVÉ (1975) determinaram o coeficiente de descarga para estruturas com crista em perfil meia circunferência, expresso em função da relação entre a carga sobre a crista e a altura da crista (H_t/P), e a relação entre esta carga e o raio de curvatura do perfil (H_t/R). O limite entre o escoamento pressurizado e o subatmosférico ocorre com valores de H_t/R próximos a 1,3.

No trabalho apresentado por BABB (1976), *apud* FALVEY (2003), que analisou o comportamento de modelo do vertedouro labirinto da Barragem de Boardman, o escoamento pressurizado ocorreu para valores de H_t/P menores que 0,3, o que equivale a valores de H_t/R menores que 3,6. Para valores acima deste, BABB (1976) verificou que a lâmina projeta-se livremente e volta à condição aerada. FALVEY (2003) comenta que essa diferença, entre estes valores e aqueles apresentados por INDLEOKOFER e ROUVÉ (1975), pode ser explicada pelos distintos ângulos α utilizados nos modelos pelos autores.

Através de um modelo experimental AMANIAN (1987), *apud* FALVEY (2003), desenvolveu ábacos para o escoamento em condição atmosférica (Figura 2.5) e subatmosférica (Figura 2.6), que estima o coeficiente de descarga para estruturas com a crista com perfil meia circunferência. Os testes foram conduzidos para valores de H_t/R maiores do que 2.0.

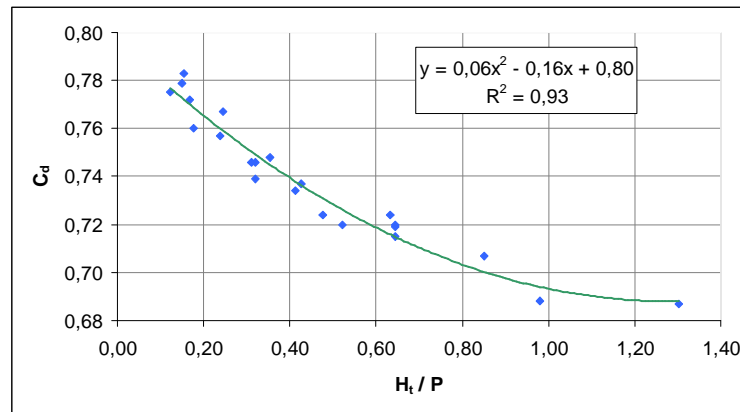


FIGURA 2.5 – COEFICIENTES DE DESCARGA PARA O ESCOAMENTO EM CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS PROPOSTO POR AMANIAN (1987), APUD FALVEY (2003).

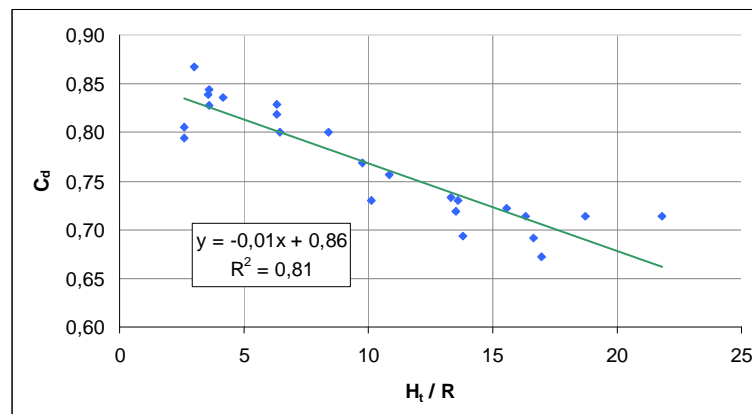


FIGURA 2.6 – COEFICIENTES DE DESCARGA PARA O ESCOAMENTO EM CONDIÇÕES SUBATMOSFÉRICAS PROPOSTO POR AMANIAN (1987), APUD FALVEY (2003).

Crista com perfil tipo ogiva ("ogee crest"):

De acordo com FALVEY (2003), o perfil ogiva, também conhecido como perfil padrão WES (*Waterways Experiment Station*), é definido pela trajetória da lâmina de água vertente sobre a crista chanfrada fictícia (localizada da face montante), conforme apresentado na figura 2.3. O U.S. BUREAU OF RECLAMATION (1974) apresenta curvas para determinação do coeficiente de descarga de estruturas com perfil tipo ogiva (Figura 2.7).

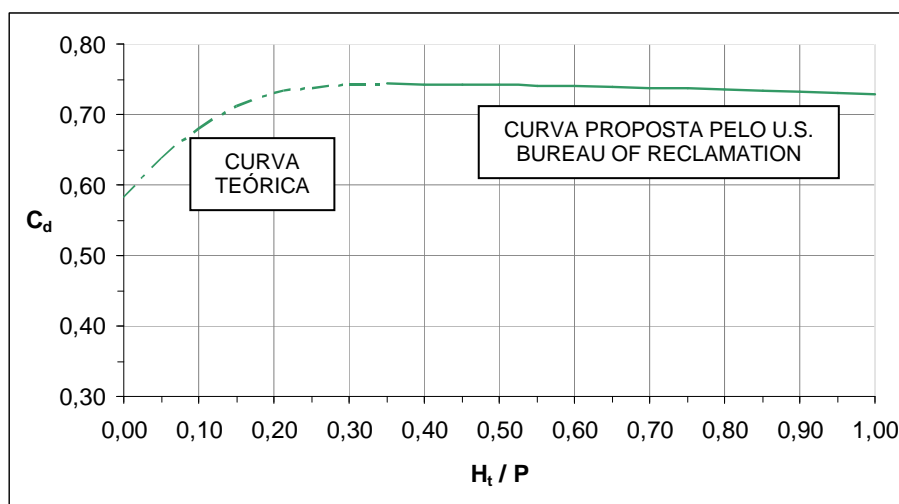


FIGURA 2.7 – COEFICIENTES DE DESCARGA PARA CRISTAS COM PERFIL EM OGIVA APRESENTADOS POR FALVEY (2003).

Um modelo desse perfil foi desenvolvido por MAGALHÃES e LORENA (1989), que recomendam que o perfil seja estendido além do cume da crista (figura 2.8). Mesmo com esta extensão, os coeficientes de descarga deveriam ser iguais aos apresentados na Figura 2.7. Entretanto, vertedouros labirinto com crista de perfil padrão WES, provavelmente apresentarão coeficiente de descarga menor, se comparado ao perfil tipo ogiva tradicional, devido ao aumento da interferência da lâmina vertente a jusante. FALVEY (2003) afirma que essa configuração está sujeita à vibrações e apresenta valores de C_d pequenos em condições de cargas elevadas, se comparado com os perfis quarto de circunferência e meia circunferência, além de apresentar maior complexidade do ponto de vista construtivo. Entretanto é aceito que o perfil não influencia fortemente na capacidade de descarga.

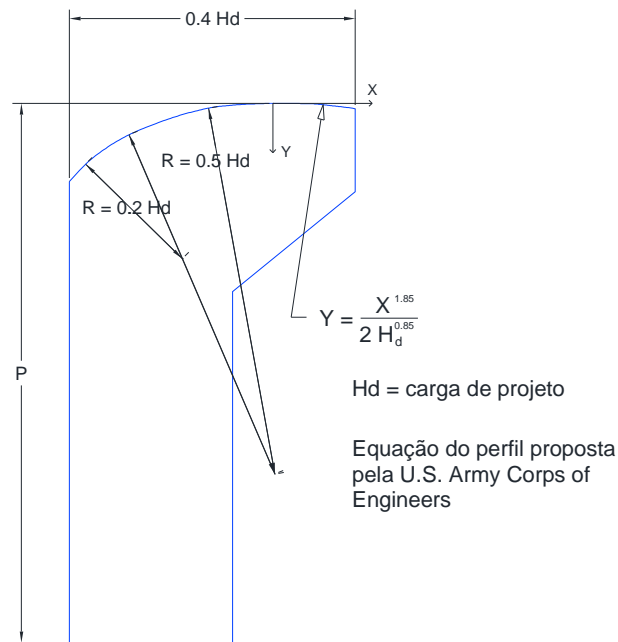


FIGURA 2.8 – PERFIL DO TIPO WES PROPOSTO POR MAGALHÃES (1989).

2.3 Parâmetros de Projeto

O estudo realizado por HAY e TAYLOR (1970) fornece os principais elementos para o projeto de vertedouros labirinto:

$\underline{Q_L/Q_N}$: Relação entre a vazão de um vertedouro com crista em labirinto e com crista retilínea, com mesmo perfil, ocupando a mesma largura, para uma dada carga de operação. Designa-se como performance do vertedouro.

$\underline{H/P}$: Relação entre a carga de operação e a altura da crista do vertedouro. Quanto menor esta relação, maior será o valor de Q_L/Q_N .

$\underline{L/W}$: Relação entre o comprimento total da crista do vertedouro e a largura total do canal. É o chamado fator de amplificação da crista. Quanto maior este fator, maior será o valor de Q_L/Q_N . Contudo, na prática raramente se verificam valores de L/W superior a 8, já que os custos extras da estrutura não compensariam o aumento obtido na relação Q_L/Q_N .

$\underline{\alpha / \alpha_{máx.}}$: Relação entre o ângulo formado entre as paredes laterais e a direção principal do escoamento, e seu valor máximo. Teoricamente, à medida que este parâmetro aumenta, o valor de Q_L/Q_N também aumenta. Porém, na prática, isto pode não ser verificado, pois é possível ocorrer interferência dos escoamentos junto aos vértices da crista, provocando uma diminuição na capacidade de vazão.

w/P : Relação entre a largura de um ciclo da crista do vertedouro e a altura desta. Esta relação não deve atingir valores muito pequenos. Quando este parâmetro tende para valores próximos de zero, o vertedouro passa a ser constituído por pequenos ciclos triangulares que são “ignorados” pelo escoamento, não resultando em um aumento de desempenho perante um vertedouro retilíneo. Este parâmetro não deve ser menor que 2,5.

HAY e TAYLOR (1970) introduziram a relação Q_L/Q_N e criaram ábacos para soleiras horizontais (forma trapezoidal ou triangular) em que esta relação é função dos parâmetros L/W e H_t/P . Os autores afirmam que, à medida que a carga de operação se aproxima de zero, a relação Q_L/Q_N tende para o valor de L/W .

TULLIS *et al.* (1995) afirmam que as variáveis que devem ser consideradas no projeto de um vertedouro labirinto são o comprimento e a largura do labirinto, a altura da crista, o ângulo formado na direção do escoamento e o número de ciclos, entre outras de menor importância. A capacidade dessa estrutura é função da carga total, do comprimento efetivo da crista e do coeficiente de descarga, sendo este último dependente também da carga total, da altura do vertedouro, do formato e da espessura da crista, da configuração do vértice formado e do ângulo formado na direção do escoamento.

LOPES *et al.* (2006a) relacionam em sua pesquisa os principais métodos encontrados na literatura para estimar o coeficiente de descarga para soleiras horizontais com forma trapezoidal. Para estruturas com perfil quarto de círculo este coeficiente pode ser determinado a partir de algumas expressões propostas:

DARVAS (1970): A expressão proposta para o cálculo do coeficiente de descarga normal calculado em função da largura W (C_w) é válida para os parâmetros: $0,2 \leq H_t/P \leq 0,6$ e $2 \leq L/W \leq 8$.

$$C_w = \frac{Q}{W \cdot h^{1,5}} \quad ; \text{ com } h = \text{altura média do escoamento a montante} \quad (2.12)$$

LUX e HINCHLIFF (1985): Introduziram o parâmetro w/P diretamente na fórmula do coeficiente de descarga C_w , para estruturas com labirinto triangular ou trapezoidal.

$$C_w = \frac{Q}{\left(\frac{w/P}{w/P + k} \right) \cdot N \cdot w \cdot H_t \cdot \sqrt{g \cdot H_t}} \quad ; \text{ com } k = \text{coeficiente de forma:} \quad (2.13)$$

0,18 para geometria triangular
0,10 para geometria trapezoidal

Segundo HAY e TAYLOR (1970), este parâmetro não influencia significativamente no cálculo do coeficiente de descarga, sendo a equação proposta desnecessariamente complicada.

TULLIS (1995): desenvolveu equações polinomiais de regressão baseadas na fórmula adotada para vertedouros lineares, em função do parâmetro H_t/P e do ângulo α , para o cálculo do coeficiente de descarga. Considera-se que essas expressões são válidas em condições em que a pressão seja atmosférica na cavidade formada entre a lâmina vertente e a soleira, e ainda que alguns parâmetros sejam limitados aos seguintes valores: $0,1 \leq H_t/P \leq 0,9$; $6^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$; $A \leq t \leq 2A$; modelo experimental com $0,152 \leq P \leq 0,229$ m. A expressão proposta calcula o valor do coeficiente de descarga adimensional (C_d):

$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3} \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{1,5}} \quad (2.14)$$

Para estruturas com crista em perfil WES:

MAGALHÃES e LORENA (1989): propuseram um novo ábaco para estimar o valor do coeficiente de descarga calculado em função da largura W (C_w), válido para: $0,1 \leq H_t/P \leq 1,0$; $2 \leq L/W \leq 5$; $w/P \geq 2,5$; modelo experimental com $P = 0,15$ m.

$$C_w = \frac{Q}{W \cdot \sqrt{2g} \cdot H_t^{1,5}} \quad (2.15)$$

O estudo realizado por LOPES *et al.* (2006a) teve como principal objetivo analisar comparativamente os métodos presentes na bibliografia para estimar o coeficiente de descarga. O método proposto por HAY e TAYLOR (1970) não foi considerado, já que a sua configuração não permite incluir os dados experimentais utilizados. CASSIDY *et al.* (1985) verificaram experimentalmente que, para elevadas cargas de operação, a vazão estimada pelo método de HAY e TAYLOR (1970) apresenta valores de 20% a 25% maiores.

LOPES *et al.* (2006a) constataram que os métodos para o cálculo do coeficiente de descarga, propostos por MAGALHÃES e LORENA (1989), LUX e HINCHLIFF (1985) e TULLIS (1995), chegam a resultados próximos (diferenças

menores que 10%) para a relação $H_t/P > 0,1$. Os resultados apresentados por DARVAS (1971) são de 11% a 25% maiores do que os outros autores. Esta discrepância pode ser explicada pelo fato deste último utilizar em seus estudos a carga piezométrica ao invés da total (desconsiderando a carga cinética). Estes resultados estão em conformidade com o apresentado na pesquisa de MAGALHÃES e LORENA (1989), que apontam valores 15% a 25% menores que aqueles propostos por DARVAS (1971).

LOPES (2006a) afirmam que as maiores diferenças foram observadas nos testes realizados com a relação $H_t/P = 0,1$. Nesta condição ocorre maior interferência do perfil da crista no cálculo do coeficiente de descarga, e maiores erros de medição para cargas de operação pequenas. Concluiu-se que, de maneira geral, a margem de erro das fórmulas de regressão propostas por TULLIS *et al.* (1995) para o cálculo de C_d , os efeitos de escala e os erros de medição, permitem explicar a ordem de grandeza das diferenças obtidas nos métodos descritos (menores que 10%). A proximidade dessas diferenças relativas apresentadas no cálculo do coeficiente de descarga, pelo método de MAGALHÃES e LORENA (1989) e DARVAS (1971), em relação ao de TULLIS *et al.* (1995), indicam que o perfil da crista não exerce uma influência significativa na capacidade do vertedouro labirinto, principalmente para $H_t/P \geq 0,1$ e $L/W < 5$.

LOPES *et al.* (2006a) verificaram ainda que o coeficiente de descarga diminui com o aumento de H_t/P , sendo essa tendência mais evidente com o aumento de L/W . Se a carga de operação for significativamente maior que a altura da crista, o coeficiente de descarga tende ao comportamento de um vertedouro retilíneo com desenvolvimento igual a largura total do vertedouro. Se a carga for significativamente menor, a estrutura comporta-se como um vertedouro retilíneo com desenvolvimento igual ao comprimento total da crista em labirinto.

Como mostra a Figura 2.9, LOPES *et al.* (2006a) comparam graficamente os coeficientes de descarga (C_w) calculados em função dos quatro métodos avaliados, em função de H_t/P e L/W . Com o intuito de facilitar a comparação, o coeficiente de descarga (C_d) estimado pelo método de TULLIS *et al.* (1995) foi recalculado conforme a equação 2.10, e representado no gráfico como o coeficiente de descarga calculado em função da largura (C_w).

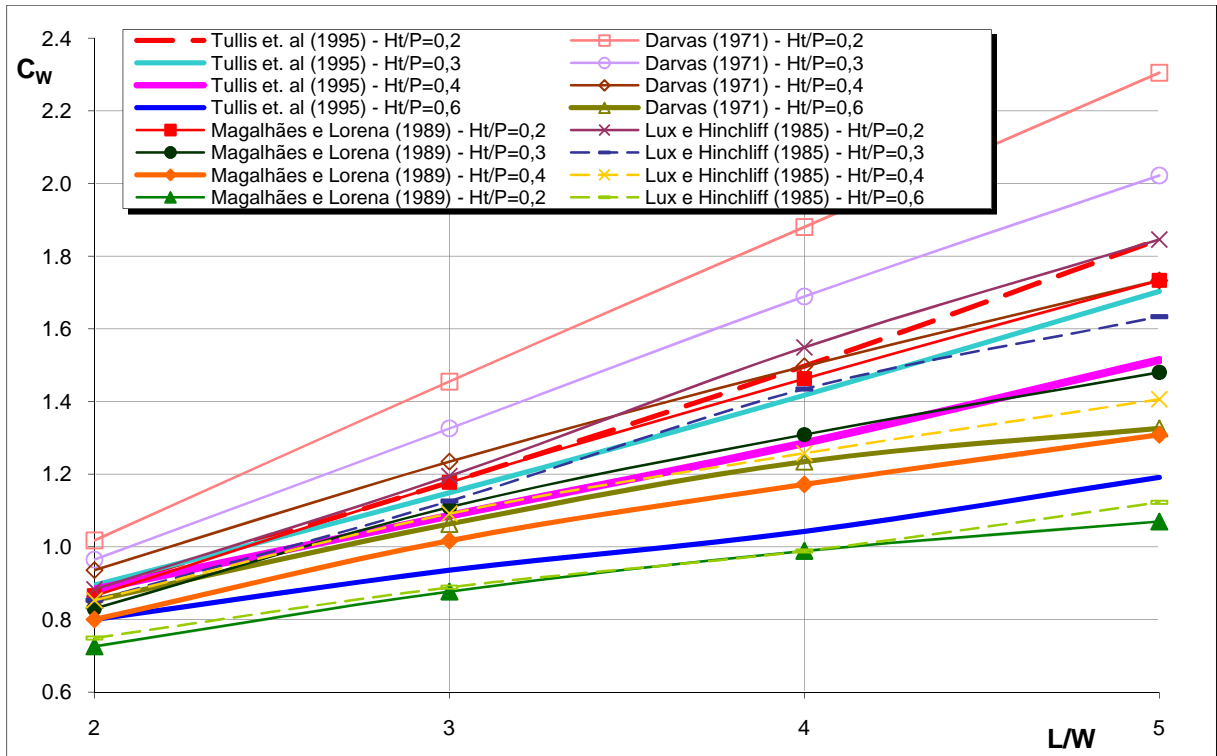


FIGURA 2.9 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DE C_w CALCULADOS SEGUNDO DARVAS (1971), MAGALHÃES E LORENA (1989), LUX E HINCHLIFF (1985) E TULLIS *et al.* (1995) – APRESENTADO POR LOPES *et al.* (2006a).

Como já mencionado anteriormente, TULLIS *et al.* (1995) desenvolveram oito equações polinomiais de regressão para o cálculo do coeficiente de descarga, em função do parâmetro H_t/P e do ângulo α :

Para $\alpha = 6^\circ$:

$$C_d = 0,49 - 0,24 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right) - 1,20 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 2,17 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1,03 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (2.16)$$

Para $\alpha = 8^\circ$:

$$C_d = 0,49 + 1,08 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right) - 5,27 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 6,79 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 2,83 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (2.17)$$

Para $\alpha = 12^\circ$:

$$C_d = 0,49 + 1,06 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right) - 4,43 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 5,18 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1,97 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (2.18)$$

Para $\alpha = 15^\circ$:

$$C_d = 0,49 + 1,00 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right) - 3,57 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 3,82 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1,38 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (2.19)$$

Para $\alpha = 18^\circ$:

$$C_d = 0,49 + 1,32 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right) - 4,13 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 4,24 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1,50 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (2.20)$$

Para $\alpha = 25^\circ$:

$$C_d = 0,49 + 1,51 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right) - 3,83 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 3,40 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1,05 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (2.21)$$

Para $\alpha = 35^\circ$:

$$C_d = 0,49 + 1,69 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right) - 4,05 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 3,62 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1,10 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (2.22)$$

Para $H_t/P < 0,7$ e $\alpha = 90^\circ$ (linear):

$$C_d = 0,49 + 1,46 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right) - 2,56 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 1,44 \cdot \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 \quad (2.23)$$

Os coeficientes de descarga observados no estudo experimental de TULLIS *et al.* (1995) também podem ser determinados pelo ábaco apresentado na figura 2.10.

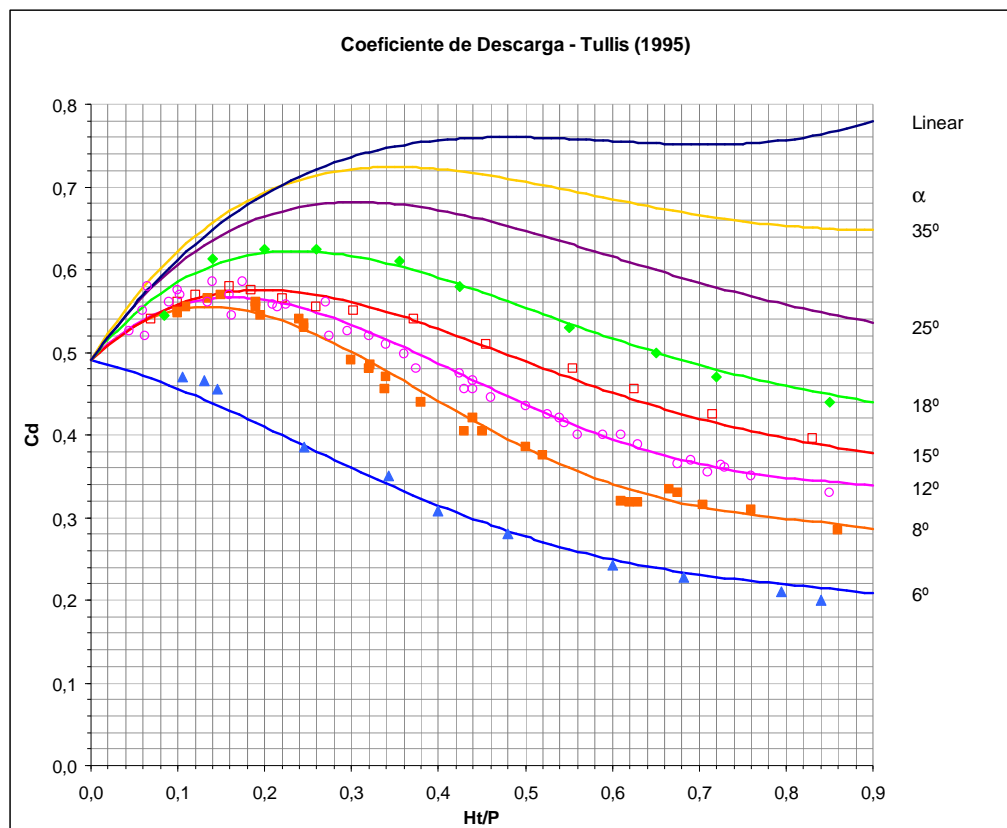


FIGURA 2.10 – COEFICIENTES DE DESCARGA DE VERTEDOUROS LABIRINTO, EM FUNÇÃO DO ÂNGULO α E DA RELAÇÃO H_t/P , SEGUNDO TULLIS *et al.* (1995).

TULLIS *et al.* (1995) citam as várias pesquisas realizadas pelo *Utah Water Research Laboratory* (UWRL), da Universidade de Utah, nos Estados Unidos, para avaliar o coeficiente de descarga em vertedouros labirinto. Os modelos foram testados com ângulos α variando de 6° a 35° , para diferentes cargas de operação. Os resultados geraram dados e procedimentos padrões para futuros projetos, baseados em um modelo específico da crista do vertedouro. Os dados de entrada do sistema são a vazão e a carga de operação. O procedimento é flexível para a seleção do número de ciclos N e do ângulo α . As limitações incluem a altura e o comprimento do vertedouro. A planilha (Tabela 2.1) proposta pelos autores calcula as dimensões do vertedouro labirinto, através dos dados de entrada, que podem variar a fim de determinar a sua influência no projeto. Existem vários *layouts* que fornecem o valor da vazão e da carga de projeto, a escolha deve ser baseada no melhor conjunto de custo e produção para cada caso.

Segundo TULLIS *et al.* (1995), os vertedouros com menor ângulo α têm capacidade significativamente maior para baixas elevações do reservatório. Os autores afirmam ainda que nos casos em que o vertedouro labirinto for adicionado a uma estrutura com reservatório já existente, em que o escoamento a jusante está limitado às baixas elevações do nível de água, a crista com menor ângulo α irá gerar uma capacidade maior do que a tolerada pela condição de jusante. Nesses casos, um labirinto largo pode ser uma melhor solução. Se a vazão mínima for muito baixa, poderá ser usada uma pequena seção do vertedouro com menor elevação para a passagem de pequenas vazões. Sendo assim, o labirinto inteiro só seria utilizado quando a cheia excedesse um nível pré-determinado, como por exemplo, a cheia de 100 anos.

Finalmente TULLIS *et al.* (1995) mostram que, na verificação do procedimento de projeto proposto, dos nove modelos reduzidos testados, apenas um apresentou uma diferença percentual relativa, entre as vazões reais e as calculadas pelo método, maior que 3,1% (o modelo do vertedouro labirinto da Barragem de Woronora apresentou um erro relativo de 6,2%). Porém, é interessante ressaltar que algumas situações particulares foram consideradas para o desenvolvimento do procedimento de cálculo. Sendo aconselhável, portanto, a verificação do desempenho do vertedouro labirinto com auxílio de um modelo de estudo, que reproduz alguns parâmetros que não são considerados no projeto, tais como as perdas na entrada, a energia dissipada, a submersão, os efeitos da aeração em

situações de pequenas cargas e as condições do escoamento nos canais de aproximação e de descarga. Se o escoamento for supercrítico no canal de descarga, o modelo ainda poderá prever ondas altas causadas pelas curvas de convergência do canal.

TABELA 2.1 – PLANILHA DE CÁLCULO PROPOSTA PARA O PROJETO DE UM VERTEDOURO LABIRINTO
PROPOSTA POR TULLIS *et al.* (1995).

Parâmetro (1)	Símbolo (2)	Valor (3)	Unidade (4)	Fonte / Equações / Notas (5)
(a) Dados de entrada do local				
Vazão Máxima	Q		m ³ /s	Entrada
Nível Máximo do Reservatório	RES		m	Entrada
Cota do Canal de Aproximação	-		m	Entrada
Cota da Crista do Vertedouro	el		m	Entrada
Carga Total de Operação	Ht		m	Ht = res - el - perda
(b) Dados adotados				
Perda estimada na entrada	Perda		m	Estimada
Número de Ciclos	N		-	Deve manter w / P entre 3 e 4
Altura da parede do Vertedouro	P		m	$P \sim 1,4 \cdot Ht$
Ângulo formado na direção do Escoamento	α		graus	Normalmente entre 8° e 16°
(c) DADOS CALCULADOS				
Espessura da parede do Vertedouro	t		m	$t = P / 6$
Largura interna do Vértice	A		m	Deve estar entre o valor de t e $2 \cdot t$
Largura externa do Vértice	D		m	Equação (2.1)
Relação Ht / P	Ht / P		-	-
Coeficiente de Descarga	C_d		-	Equações (2.16) a (2.23)
Comprimento Efetivo da Crista	L		m	Equação (2.2)
Comprimento do Vertedouro na direção do Escoamento	B		m	Equação (2.3)
Comprimento do Braço	L_1		m	Equação (2.4)
Comprimento Efetivo do Braço	L_2		m	Equação (2.5)
Comprimento Total da Crista	L_3		m	Equação (2.6)
Largura de um Ciclo	w		m	Equação (2.7)
Largura Total do Vertedouro	W		m	Equação (2.8)
Comprimento correspondente para Vertedouro Linear	-		m	Equação (2.10) - C_d para vertedouros lineares
Relação w / P	w / P		-	Deve estar entre 3 e 4
(d) VOLUME DE CONCRETO				
Volume de Concreto das Paredes	-		m ³	$vol = L_3 \cdot P \cdot t$
Volume de Concreto da Soleira	-		m ³	$vol = W \cdot B \cdot t$
Volume Total	-		m ³	-

FALVEY (2003) afirma que o procedimento de projeto de um vertedouro labirinto envolve: determinar a locação e alinhamento do labirinto, baseado nas condições do local; definir a máxima carga de operação possível, de forma a satisfazer com segurança as especificações operacionais; definir a máxima vazão que passará pela estrutura, com a máxima carga de operação já estabelecida; e

usar uma planilha eletrônica (TULLIS *et al.* – 1995) para determinar a configuração do vertedouro que irá operar com a carga e vazão anteriormente estabelecidas.

Além dos parâmetros já citados por estudos anteriores, o autor introduz o conceito de eficiência do vertedouro, como função do coeficiente de descarga (C_d), calculado pelo método de TULLIS *et al.* (2005), do ângulo formado na direção do escoamento (α) e do fator de amplificação da crista ($M = L/W$):

$$\varepsilon = \frac{C_d(\alpha) \cdot M}{C_d(90^\circ)} \quad (2.24)$$

Este parâmetro é essencialmente o mesmo que Q_L/Q_N apresentado por HAY e TAYLOR (1970). Entretanto, a eficiência leva em conta o fator de amplificação da crista em labirinto e o efeito do ângulo formado na direção do escoamento. Sendo assim, as conseqüências de alguma alteração da geometria do labirinto podem ser rapidamente estimadas por este parâmetro.

HOUSTON (1983), *apud* FALVEY (2003), desenvolveu um estudo que verificou os efeitos da localização do vertedouro labirinto, em relação ao reservatório. Como pode ser observado na Figura 2.11, o labirinto pode ser inserido no interior do canal na posição normal ou na posição invertida, posicionado na entrada do canal ou estendido para dentro do reservatório.

Os autores verificaram que a capacidade da estrutura aumenta quando o labirinto é projetado para dentro do reservatório, sendo a descarga 20% maior, se comparada às estruturas posicionadas na entrada do canal. Entretanto, essa condição está aliada a posição invertida do labirinto. Em seu trabalho, HOUSTON (1983), *apud* FALVEY (2003), verificou experimentalmente que a posição invertida é menos eficiente, e afirmam que as análises do canal de aproximação poderão necessitar de um modelo físico para a verificação do comportamento, visto que concentrações de altas velocidades podem diminuir a capacidade do vertedouro.

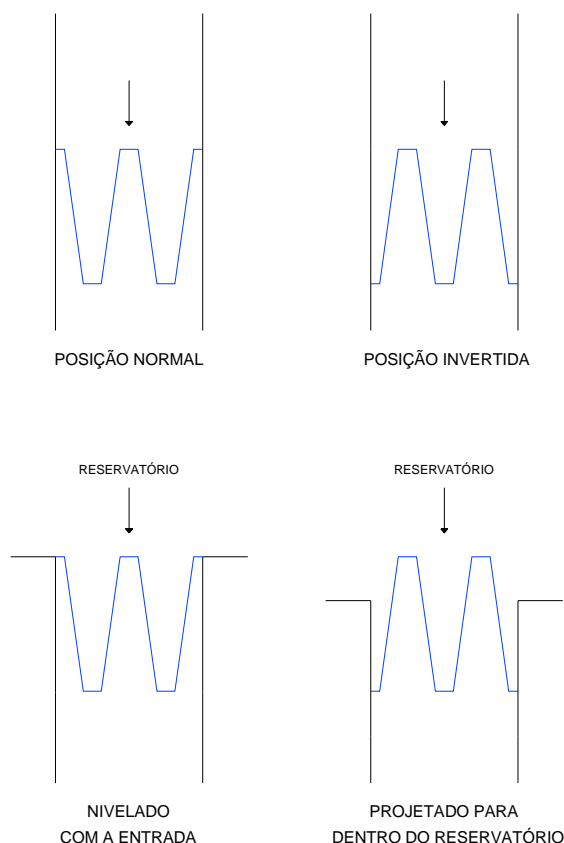


FIGURA 2.11 – LOCAÇÃO E ORIENTAÇÃO DO VERTEDOURO LABIRINTO PROPOSTA POR HOUSTON (1983), APUD FALVEY (2003).

O estudo realizado por MELO *et al.* (2002) propõe a inclusão da influência do ângulo formado pelos muros do canal convergente (θ) na curva de descarga, para vertedouros labirinto com crista de apenas um ciclo (Figura 2.12). MELO *et al.* (2002) afirmam que além da influência dos parâmetros geométricos do vertedouro, as características hidráulicas podem ser significativamente afetadas pelas condições de aproximação do escoamento, já que este é relativamente complexo. Seu processo é dado em zonas de geometria assimétrica devido aos efeitos das margens onde geralmente os vertedouros labirinto são implantados, e apresenta velocidade de escoamento significativa, já que os canais de aproximação são pouco profundos por razões econômicas. Esses parâmetros já foram identificados na bibliografia, mas não quantificados adequadamente.

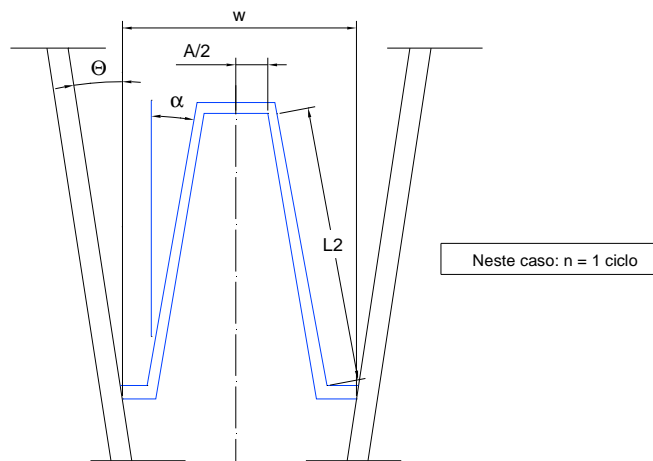


FIGURA 2.12 – LAYOUT PROPOSTO POR MELO et al. (2002) PARA VERTEDOUROS LABIRINTO COM APENAS UM CICLO.

MELO *et al.* (2002) realizaram estudos experimentais destinados a verificar a influência da convergência dos muros, traduzida pelo coeficiente denominado k_θ , na capacidade de vazão de vertedouros com crista de apenas um ciclo. Em estruturas com muros convergentes, que apresentam elevado número de ciclos, a capacidade de vazão só é afetada nos ciclos extremos, ou seja, quanto maior for o número de ciclos, menor será a influência desse coeficiente na vazão.

Neste estudo, admitiu-se que o escoamento de aproximação apresenta condições de simetria em relação ao eixo do canal, e que as extremidades dos muros a montante possuem uma geometria apropriada para reduzir significativamente a separação do escoamento nesta zona, desprezando, portanto, este efeito. Sendo assim, o único parâmetro que foi considerado na análise da influência nas condições de aproximação, e conseqüentemente, na capacidade de vazão, foi o grau de convergência das paredes do canal em que está inserida a estrutura.

Com os valores k_θ em função de H_t/P e θ , MELO *et al.* (2002) corrigiram a equação proposta por MAGALHÃES e LORENA (1989):

$$Q = k_{\theta} \cdot C_w \cdot W \cdot \sqrt{2g} \cdot H_t^{1,5} \quad (2.25)$$

Os resultados obtidos foram representados em forma gráfica (Figura 2.13), válidos para labirintos com crista de apenas um ciclo. Observou-se uma redução na capacidade de descarga da estrutura na presença de condições de afogamento por jusante, principalmente para as situações com $H_t/P > 0,44$ e $\theta > 30^\circ$. O estudo

considera que o parâmetro k_θ , para estas situações, constitui uma correção aceitável ao coeficiente de descarga do vertedouro, estando a favor da segurança ao considerarem a convergência dos muros.

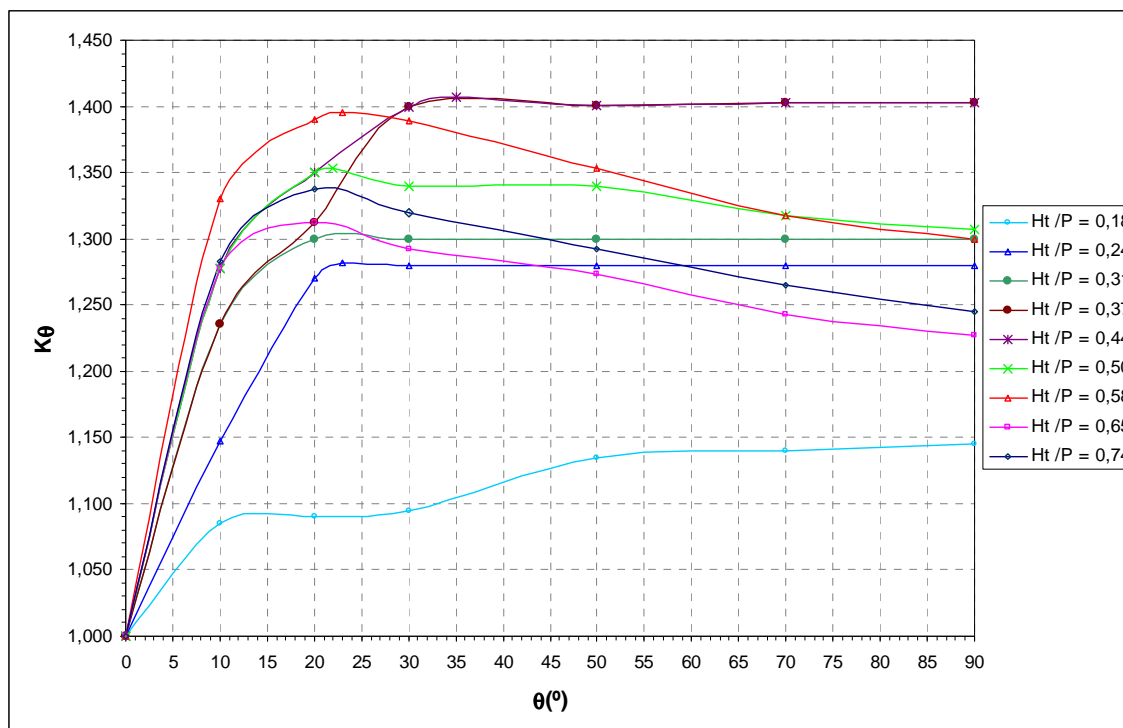


FIGURA 2.13 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA VARIAÇÃO DO PARÂMETRO DE CONVERGÊNCIA DOS MUROS (K_θ) APRESENTADA POR MELO *et al.* (2002).

A validade da pesquisa realizada por MELO *et al.* (2002) foi conferida através da concordância dos dados obtidos e estimados, resultando em uma evidente vantagem em se considerar a correção com base no parâmetro de convergência. Entretanto, os autores propõem uma melhor análise deste parâmetro, para faixa de variação mais ampla da relação H_t/P , e para uma possível dependência do fator de amplificação da crista (L/W).

2.4 Características do Escoamento

O *U.S. of Reclamation* afirma que os padrões dos escoamentos em vertedouros labirinto são bastante complicados. Os parâmetros primários afetam o escoamento, e consequentemente, o desempenho da estrutura. Idealmente, as vazões dos vertedouros labirinto deveriam aumentar proporcionalmente, com o aumento do comprimento da crista. Entretanto, esta proporção apenas ocorre em situações que envolvem pequenos valores das relações L/W e H_t/P . Devido ao baixo

desempenho de vertedouros labirinto que são projetados para operar em condições que excedem essas restrições, a análise da performance do vertedouro é complicada. Basicamente, este desempenho é determinado pelos padrões do escoamento nos canais a jusante e a montante de cada ciclo. Portanto, a geometria da estrutura deve ser escolhida de forma a permitir uma distribuição “ótima” do escoamento nessas áreas (HINCHLIFF e HOUSTON – 1984, *apud* U.S. BUREAU OF RECLAMATION).

Segundo CROOKSTON e TULLIS (2008) os diferentes perfis geométricos possíveis para a crista da estrutura em labirinto e suas configurações resultam em um escoamento tridimensional complexo, o que produz comportamentos hidráulicos distintos. O arrastamento de ar, a formação de ondas supercríticas, a aeração, a interferência, a oscilação e a instabilidade da lâmina vertente podem ser motivos de preocupação nas configurações do projeto.

De acordo com FALVEY (2003), as linhas de corrente possuem características peculiares, quando se trata de estruturas com formação de um ângulo agudo, o que não é observado em vertedouros retilíneos. A crista do vertedouro labirinto não é estabelecida perpendicularmente à direção do escoamento, mas sim a um certo ângulo, o que gera linhas de corrente tridimensionais. No escoamento tridimensional as grandezas que ditam a condição do fluxo variam nas três dimensões. As linhas de corrente abaixo da lâmina vertente são, em geral, perpendiculares à crista, enquanto que, na superfície livre, as linhas de corrente estão alinhadas com a direção de jusante.

FALVEY (2003) afirma que as características tridimensionais do escoamento tornam impossível uma representação matemática precisa. Entretanto, pesquisadores utilizaram modelos físicos para determinar a magnitude dos diversos coeficientes e parâmetros presentes em suas equações, tais como a energia total do canal, o número de Froude, o ângulo formado na direção do escoamento, entre outros.

2.5 Interferência da Lâmina Vertente

De acordo com FALVEY (2003), o escoamento em vertedouros labirinto possui um caráter complexo devido à interferência dos jatos no vértice de montante da crista. Para grandes vazões, os jatos dos ciclos adjacentes se chocam e criam

uma lâmina vertente não aerada, o que reduz o coeficiente de descarga do vertedouro e o torna menos eficiente. Esta interferência aumenta com a redução do ângulo α , principalmente com o aumento da carga sobre a crista. Como resultado, para a maioria dessas estruturas, a parte inferior da lâmina vertente é aerada apenas para baixas cargas de operação.

Segundo INDLEOKOFER e ROUVÉ (1975), o grau e a área de interferência são funções da carga sobre a crista do vertedouro (H_t), da altura da crista (P), do ângulo (α) e do comprimento do braço do vertedouro (L_1), conforme a Figura 2.14.

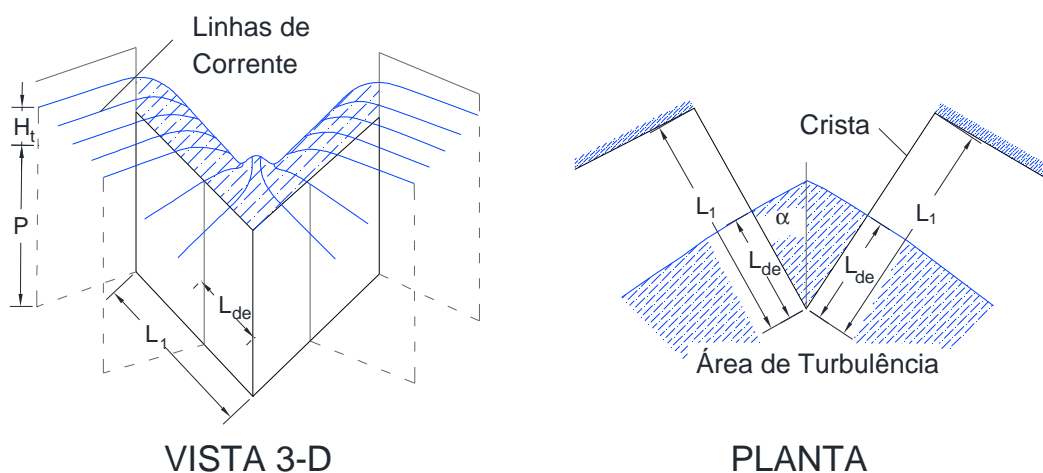


FIGURA 2.14 – INTERFERÊNCIA DA LÂMINA VERTENTE EM VERTEDOUROS LABIRINTO PROPOSTA POR INDLEOKOFER E ROUVÉ (1975), APUD FALVEY (2003).

Através de um modelo experimental foi desenvolvida a equação que estima o comprimento efetivo de interferência (L_{de}):

$$\frac{L_{de}}{H_t} = 6,1 \cdot e^{-0,052 \cdot \alpha} \quad (2.26)$$

O efeito do comprimento de interferência pode ser observado através do gráfico apresentado pelo autor, que relaciona este parâmetro aos vertedouros labirinto de um, dois, quatro e oito ciclos (Figura 2.15). A estrutura com oito ciclos apresenta o valor da relação L_{de}/L_1 igual a 0,5, situação em que a interferência afeta fortemente a capacidade de descarga do vertedouro. Com a redução do número de ciclos, o efeito da interferência é reduzido. FALVEY (2003) ainda recomenda que este parâmetro não deve ser maior que 0,3.

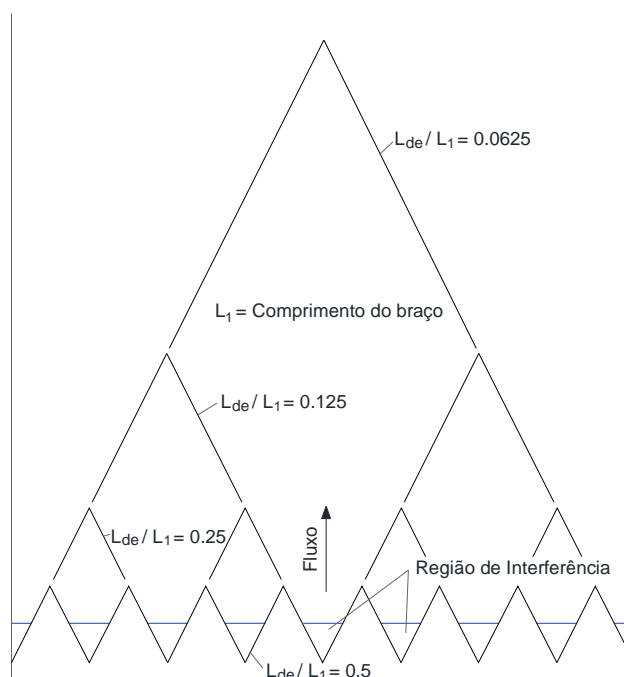


FIGURA 2.15 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS EFEITOS DA INTERFERÊNCIA EM VERTEDOUROS LABIRINTO PROPOSTA POR FALVEY (2003).

2.6 Aeração e Araste de Ar

De acordo com YILDIZ e ÜZÜCEK (1996), o escoamento complexo observado em vertedouros labirintos, é criado devido à forma da crista dessas estruturas. LUX e HINCHLIFF (1985) definiram as quatro fases básicas do escoamento, ocasionadas pelo aumento da carga:

Totalmente Aerada: Ocorre em condições de pequenas cargas a montante, quando o escoamento flui livremente pela crista. A direção de aproximação do escoamento e a velocidade ainda podem influenciar no coeficiente de descarga. Entretanto, a espessura da lâmina vertente e o nível de água a jusante não afetam a capacidade da estrutura.

Parcialmente Aerada: Com o aumento da carga, o nível de água a jusante aumenta, particularmente entre a lâmina vertente e a parede do labirinto. Devido à convergência das lâminas vertentes, à pequena área do vértice de montante, e ao nível de água a jusante, a aeração abaixo da lâmina torna-se difícil. Esta condição representa o início da interferência da lâmina vertente e da fase parcialmente aerada, que resulta em uma diminuição do coeficiente de descarga. Como consequência, o

escoamento nos vértices de montante começa a se tornar suprimido, e para manter a aeração, o ar é extraído por baixo da lâmina no vértice de jusante, formando um bolsão de ar ao longo da parede.

Transição: Com o contínuo aumento da carga de montante, a lâmina vertente começa a ficar suprimida em vários pontos ao longo da crista. Os bolsões de ar são quebrados em pequenas bolhas que se movem ao longo das paredes, causando instabilidades na lâmina. Esta fase é caracterizada pela lâmina vertente intercalando entre a condição de arrastamento de ar não contínuo e de escoamento consistente, identificada também por uma descontinuidade na curva de descarga.

Suprimida: É dada quando o fluxo forma uma lâmina não aerada. A espessura da lâmina vertente e o nível de água a jusante não permitem que o ar seja extraído pela parte inferior. Com o aumento progressivo da carga a montante, essa condição do escoamento leva a submersão do vertedouro labirinto.

De acordo com YILDIZ e ÜZÜCEK (1996), vertedouros labirinto com baixas cargas e lâminas vertentes não aeradas vêm sendo estudados por vários pesquisadores. Nestas condições de escoamento, oscilações e perturbações são produzidas pela alternância de pressão atmosférica e subatmosférica abaixo da lâmina vertente. A pressão subatmosférica ajuda a aumentar a vazão, mas pode criar problemas estruturais devido à vibração e à ressonância. As soluções mais comuns para aeração incluem a instalação de pilares que dividem o escoamento, ou de uma galeria de ar junto às paredes do vertedouro.

Segundo FALVEY (2003), devido às preocupações em relação à qualidade da água, o comportamento do vertedouro labirinto aerado e não aerado deve ser considerado para o projeto da estrutura. O fluxo turbulento, que ocorre em quedas de água, pode conduzir a condições de escoamento saturado. É esperado que os vertedouros labirinto sejam instrumentos efetivos na melhoria da aeração, visto que o comprimento efetivo destas estruturas é maior do que de vertedouros lineares.

FALVEY (2003) descreve os estudos conduzidos para a verificação da aeração em vertedouros labirintos, realizados por WORMLEATON e SOUFIANI (1998) e WORMLEATON e TSANG (2000). O processo de aeração é normalmente descrito pela taxa de déficit (r):

$$r = \frac{C_s - C_u}{C_s - C_{ds}} = e^{\left(\frac{k_t \cdot A_c \cdot t_c}{V_a}\right)} \quad (2.27)$$

Sendo:

C_s – Concentração saturada

C_u – Concentração a montante

C_{ds} – Concentração a jusante

k_t – Coeficiente do volume líquido na interface ar-água

A_c – Área de contato

t_c – Tempo de contato

V_a – Volume de ar arrastado

As concentrações são medidas em termos de oxigênio ou de ar. Uma simplificação comum utilizada considera que a concentração de oxigênio e ar na atmosfera é constante, quando o ar é dissolvido na água. Entretanto, essa consideração nem sempre é verdadeira. O valor de r varia entre 1, que representa a situação não aerada, e ∞ , que representa a saturação total de jusante.

Devido à dificuldade de mensurar alguns dos parâmetros presentes na equação acima, tais como A_c , t_c , e V_a , uma equação alternativa foi desenvolvida por WORMLEATON e SOUFIANI (1998), que define a eficiência E :

$$E = 1 - \frac{1}{r} = \frac{C_{ds} - C_u}{C_s - C_u} \quad (2.28)$$

Este parâmetro varia entre 0%, que representa a situação não aerada, e 100%, que representa a saturação total de jusante. A figura abaixo apresenta uma comparação da eficiência da aeração, como função da vazão, apresentada por WORMLEATON e TSANG (2000).

Esses autores verificaram que vertedouros labirinto com crista retangular são mais eficientes em termos de aeração, se comparados aos com crista triangular, visto que, em situações de grandes vazões, a interferência da lâmina vertente é maior em estruturas em labirinto com a crista triangular. Concluiu-se que a interferência torna-se insignificante nessas estruturas quando a taxa de vazão aumenta. O estudo mostrou ainda que, em situações de baixa vazão, com carga de

operação da ordem de 1,5 m, os vertedouros labirinto com crista triangular e retangular possuem a mesma eficiência, em torno de 70%.

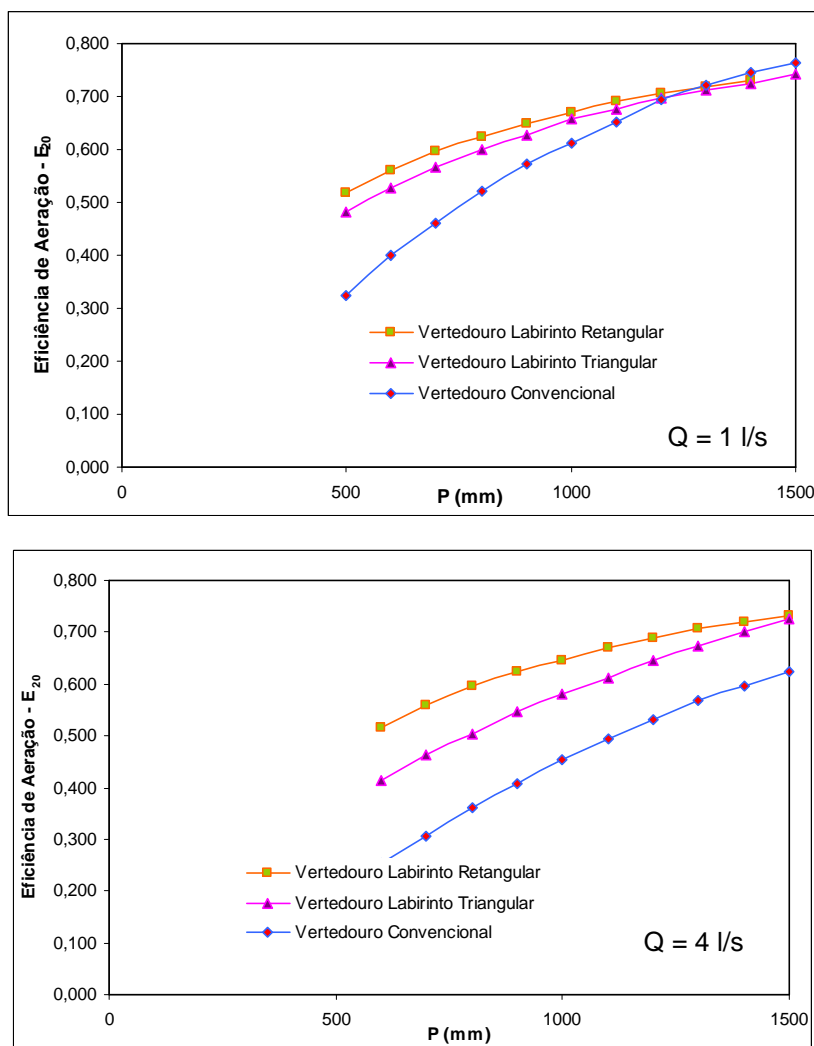


FIGURA 2.16 – COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE AERAÇÃO EM CADA ESTRUTURA, EM FUNÇÃO DA VAZÃO, PROPOSTA POR WORMLEATON E TSANG (2000).

TSANG (1987), *apud* FALVEY (2003), apresenta a descrição do comportamento dos quatro tipos de impacto de jatos na bacia receptora, denominados tipo A, B, C, e D, e definidos na figura 2.17.

O estudo realizado por GAMESON (1957), *apud* EMIROGLU e BAYLAR (2005), demonstrou três mecanismos de transferência de oxigênio para um jato em queda livre, mergulhado em uma bacia receptora: no próprio jato durante a queda (a quantidade de oxigênio transferido nesta forma é considerada pequena); através da superfície livre da bacia receptora, em função da intensidade da agitação; no escoamento bifásico água-ar (mecanismo mais significativo em termos de contribuição no processo de oxigenação), que ocorre devido ao arrastamento de ar.

Esta fase é governada pela taxa de arraste de ar e pelo tempo de contato da bolha de ar com a água.

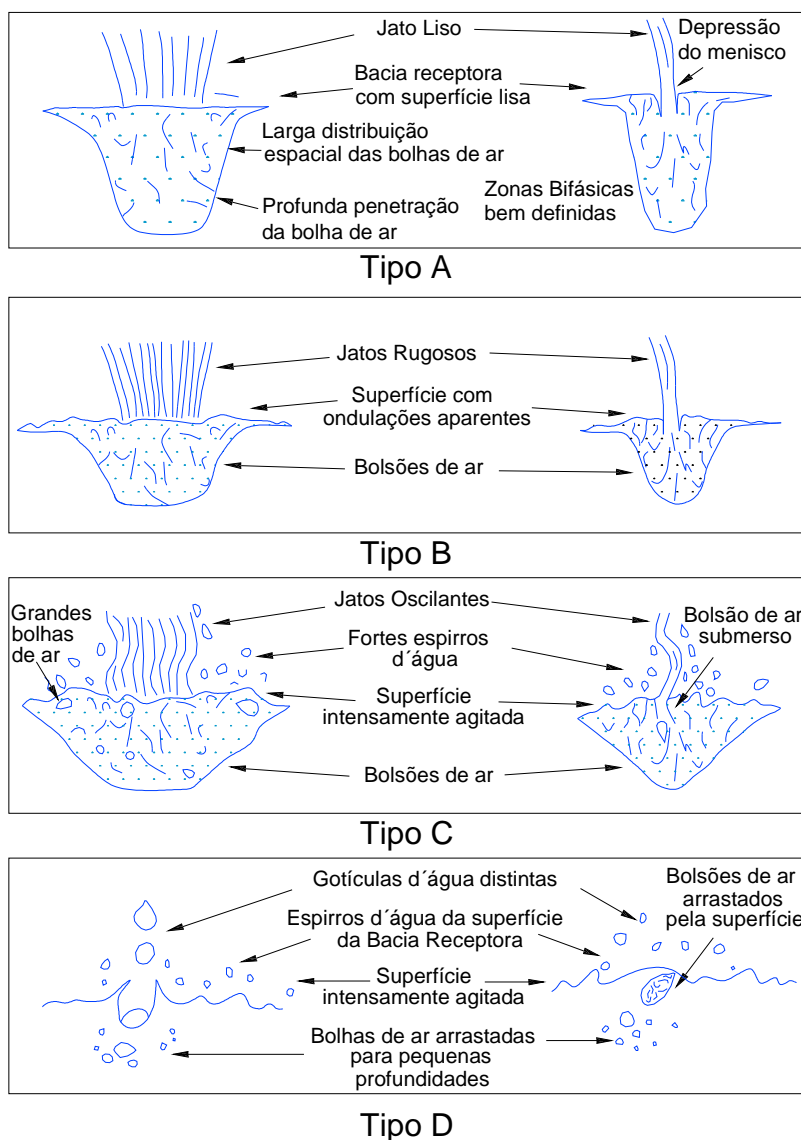


FIGURA 2.17 – QUATRO TIPOS DE IMPACTO DO JATO NA BACIA RECEPTORA DE JUSANTE PROPOSTOS POR TSANG (1987), APUD FALVEY (2003).

De acordo com TSANG (1987), *apud* EMIROGLU e BAYLAR (2005), os quatro mecanismos básicos de arraste de ar, referentes ao jato em queda livre de um vertedouro são: suave, áspero (rugoso), oscilante e desintegrado. Para pequenas alturas de vertimento, um jato de água com superfície relativamente lisa é descarregado pelo vertedouro. Nesses casos, a maior fonte de fornecimento de ar é observada como uma fina camada que envolve o jato, que é transportado para dentro da água devido ao impacto, tornando a capacidade de arraste limitada. Nessas condições, a superfície livre na bacia receptora é relativamente não-perturbada.

Com o aumento da altura de vertimento, a superfície do jato torna-se rugosa. O fornecimento de ar aumenta com a entrada de pequenas bolhas de ar entre o jato de superfície rugosa e a bacia receptora. Com o impacto, os jatos produzem ondulações na superfície da bacia. Comparado com o jato liso, sob condições similares, este mecanismo resulta em uma rasa penetração de ar. Porém é observado aumento da taxa de arraste, já que as bolhas são densamente compactadas na zona bifásica.

Os jatos começam a oscilar com o contínuo aumento da altura de vertimento. A primeira fonte de ar é originada por grandes bolsões que ficam entre o jato e a superfície da bacia. Esta se encontra agitada, causando possível arraste de ar através do espirro de água. Os grandes bolsões de ar são transportados da superfície até uma pequena profundidade, e são rompidos devido à turbulência. Considerando um aumento ainda maior da altura de vertimento, o jato se quebra em pequenas gotículas e a superfície da bacia torna-se bastante agitada, causando o arraste de ar devido à formação de fragmentos de jato que envolvem os bolsões de ar e atingem a superfície da bacia.

O estudo de EMIROGLU e BAYLAR (2005) descreve uma investigação experimental que analisa a taxa de arraste de ar em vertedouros labirintos triangulares, e em particular, o efeito da variação do ângulo interno da crista (2α) e da inclinação do perfil da crista (ϕ). A variação desses parâmetros dita o comportamento do jato de água (WORMLEATON e SOUFIANI – 1998), e consequentemente o arraste de ar.

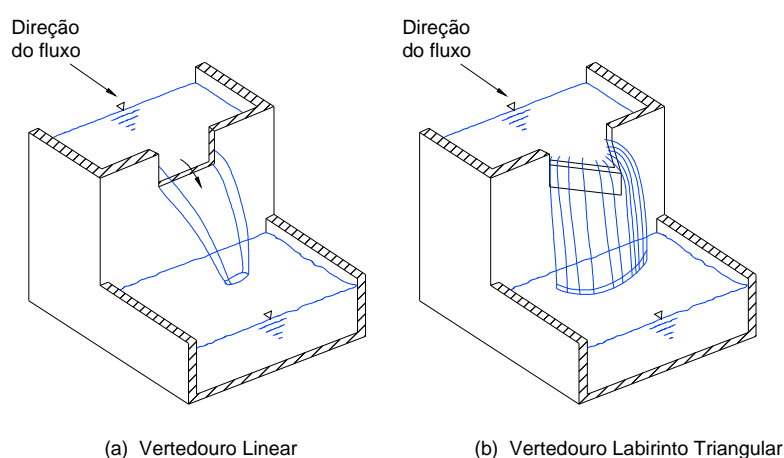


FIGURA 2.18 – ILUSTRAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS JATOS, EM UM VERTEDOIRO LINEAR E EM UM VERTEDOIRO LABIRINTO TRIANGULAR, APRESENTADO POR EMIROGLU E BAYLAR (2005).

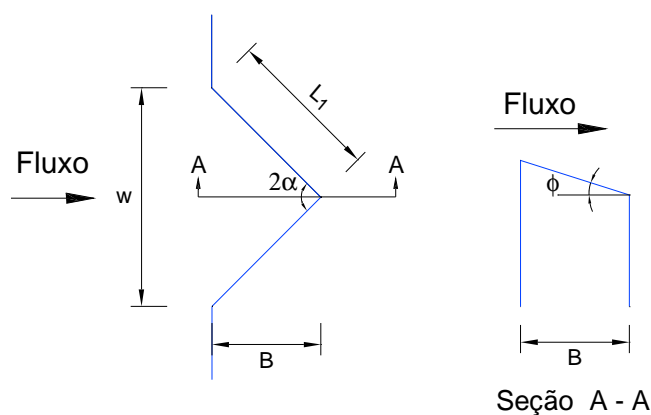


FIGURA 2.19 – DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE VERTEDOUROS LABIRINTO TRIANGULARES APRESENTADO POR EMIROGLU E BAYLAR (2005).

O cenário estudado é composto por um vertedouro labirinto triangular, com o jato de água imerso na bacia receptora de jusante, cuja altura poderia ser ajustada através de um conjunto de roldanas. Considerando que o arrastamento de ar causado pelos jatos ocorre como um fenômeno localizado no ponto de imersão, foram desenvolvidos dois métodos para a medição desta taxa: capturando o ar após ter sido arrastado para a bacia receptora; e medindo o ar removido do espaço gasoso acima da superfície da bacia, em volta do ponto de imersão.

De acordo com EMIROGLU e BAYLAR (2005), a profundidade da bacia receptora pode influenciar na eficiência da aeração do jato de queda, devido a transferência de massa de oxigênio, já que esta, em certa medida, depende do tempo de permanência das bolhas de ar dentro da água. Se a profundidade da bacia for menor que a profundidade de penetração da bolha, o caminho do escoamento das bolhas na água será abreviado pelo leito da bacia, gerando tempos de residência e eficiência de aeração limitados. EMIROGLU e BAYLAR (2005) citam que o estudo experimental realizado por WORMLEATON e TSANG (2000) verificou a profundidade de penetração e determinou o efeito relativo à profundidade da bacia. Foi confirmado que a eficiência da aeração, em geral, não é afetada pela profundidade da bacia, quando esta é maior que a profundidade de penetração da bolha. Em todos os vertedouros labirintos testados a profundidade da bacia receptora de jusante foi mantida maior do que a profundidade de penetração da bolha, a fim de garantir as condições ótimas de arrastamento de ar.

Os resultados mostraram que a altura de queda e a vazão do vertedouro influenciam na taxa de arraste de ar. Com o aumento da queda, o jato liso torna-se rugoso resultando em um escoamento de ar maior na bacia receptora de jusante. O

acréscimo de vazão eleva a taxa de arraste, o que pode ser associado ao aumento da quantidade de movimento do escoamento do jato.

A pesquisa apontou que o ângulo interno e a inclinação da crista em labirinto são fatores importantes, já que estes definem a forma da lâmina vertente, e esta influencia fortemente na taxa de arraste de ar. Quanto maior a inclinação da crista do vertedouro, maior será taxa de arraste de ar. A maior taxa de arraste foi observada com inclinação igual a 45° e com ângulo interno igual a 135° . Os vertedouros labirinto triangulares com essas dimensões são recomendados pelos autores para o uso em processos de aeração.

EMIROGLU e BAYLAR (2005) desenvolveram equações de regressão, que correlacionam empiricamente a vazão, a altura de vertimento, o ângulo interno e a inclinação da crista, e a taxa de arraste de ar. E concluíram que, em geral, as taxas de arraste de ar nos vertedouros labirinto triangulares testados foram maiores que as apresentadas pelos vertedouros lineares.

$$Q_A = 1,128 \cdot Q^{0,696} \cdot h^{1,074} \cdot 0,095^{\cos \phi} \cdot 1,154^{\sin 2\alpha} \quad ; \text{ para } 22,5^\circ \leq \phi \leq 45^\circ \quad (2.29)$$

$$Q_A = 0,0033 \cdot q^{0,166} \cdot h^{1,955} \cdot 1,193^{\cos \alpha} \quad ; \text{ para } \phi = 0^\circ \quad (2.30)$$

O estudo realizado por TULLIS *et al.* (2005) objetivou otimizar a capacidade de escoamento em vertedouros labirinto que operam com pequenas cargas, verificando principalmente a eficiência de aeração dessas estruturas. Para tanto, um modelo reduzido foi conduzido no *Utah Water Research Laboratory* (UWRL), para avaliar a substituição do vertedouro da Barragem de Brazos (constituído por duas comportas hidráulicas). O estudo examinou a influência de diferentes tipos de perfil de crista (quarto de circunferência, meia circunferência e tipo ogiva) e do ângulo formado na direção do escoamento (7° e 8°), na eficiência do vertedouro.

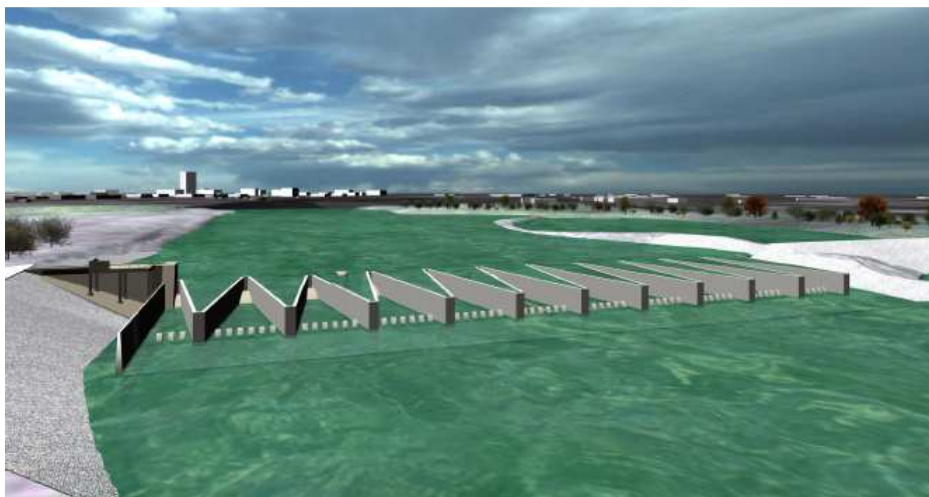


FIGURA 2.20 – REPRESENTAÇÃO CONCEITUAL, DO VERTEDOURO LABIRINTO OPERANDO COM PEQUENA CARGA, DO PROJETO DESENVOLVIDO PARA BARRAGEM DE BRAZOS, APRESENTADO POR TULLIS *et al.* (2005).

Nesse estudo, a escolha pelos três tipos de perfis de crista foi atribuída às questões de aeração da lâmina vertente. A aeração da lâmina vertente reduz significativamente o potencial de flutuações de pressões e as pressões negativas localizadas. Porém, possui a desvantagem de diminuir a eficiência de escoamento do vertedouro, se comparado aos casos de não aeração da lâmina, por requerer obstruções que podem interferir na passagem do escoamento pelo vertedouro.

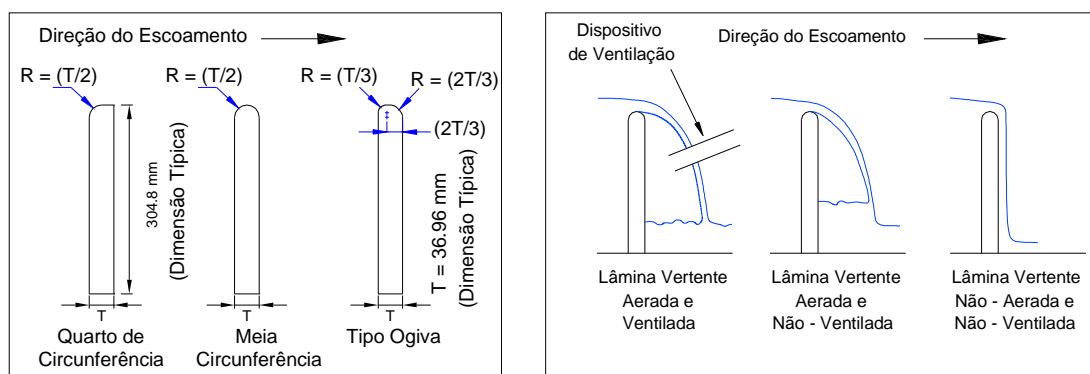


FIGURA 2.21 – REPRESENTAÇÃO DOS PERFIS DE CRISTA UTILIZADOS NO ESTUDO EXPERIMENTAL. ILUSTRAÇÕES E DEFINIÇÕES DAS CONDIÇÕES DA LÂMINA VERTENTE, APRESENTADA POR TULLIS *et al.* (2005).

O objetivo de comparar o desempenho de um vertedouro labirinto com crista tipo ogiva, meia circunferência e quarto de circunferência, é identificar uma geometria que possa reduzir a tendência de separação do escoamento a jusante do vertedouro, reduzindo as pressões negativas e a instabilidade associada a esta.

Os testes realizados incluíram 6 modelos de vertedouros labirinto trapezoidais, com os três tipos de perfil de crista, para α igual a 7° e 8° . O projeto da estrutura foi baseado no método proposto por TULLIS *et al.* (1995). A largura de cada ciclo do labirinto foi mantida constante nos modelos com α igual a 7° e 8° . Sendo assim, o comprimento efetivo da crista foi maior para aqueles com α igual a 7° .

Os resultados obtidos por TULLIS *et al.* (2005) mostraram que, para a estrutura com α igual a 7° , a condição de aeração da lâmina não possui nenhum impacto mensurável no coeficiente de descarga, tanto para os vertedouros labirinto com crista de perfil meia circunferência, quanto para perfil quarto de circunferência. A lâmina vertente não apresentou pressões negativas significativas e instabilidades, sendo assim, as estruturas apresentadas podem, possivelmente, operar sem a necessidade de obstáculos como pilares de aeração. Os autores ressaltam que outros estudos realizados pelo UWRL, em vertedouros labirinto com grandes valores do ângulo α , mostraram uma significativa variação do coeficiente de descarga para as diferentes condições da lâmina vertente.

TULLIS *et al.* (2005) afirmam que, como esperado, a crista com perfil quarto de circunferência foi menos eficiente, relativo ao do tipo ogiva e meia circunferência (para pequenas cargas, $H_t/P \leq 0.5$). O mesmo ocorreu em relação à separação do escoamento na borda de jusante no perfil quarto de circunferência. O perfil do tipo ogiva e o meia circunferência reduzem essa tendência de separação. Para maiores cargas de operação, esse fenômeno ocorre nos três tipos de perfis, e o desempenho do vertedouro torna-se independente da forma da crista.

O perfil tipo ogiva se mostrou mais eficiente, em relação ao coeficiente de descarga, para a relação $H_t/P < 0.4$. Com o aumento desse valor, esse perfil apresenta comportamento semelhante ao de meia circunferência e eventualmente ao de quarto de circunferência. Baseado nos valores máximos do coeficiente de descarga (que ocorre para $H_t/P = 0.1$), o perfil tipo ogiva apresenta um valor aproximadamente 10% maior em termos de coeficiente, se comparado ao perfil meia circunferência. Este por sua vez, também apresenta mesmo acréscimo se comparado ao perfil quarto de circunferência.

Da mesma maneira que os modelos testados com α igual a 7° , os vertedouros labirinto com 8° não apresentaram variações no coeficiente de descarga, em relação às condições da lâmina vertente. O comportamento dos três tipos de perfis, relacionado ao parâmetro H_t/P , também foi muito semelhante, variando apenas a

taxa de aumento do coeficiente de descarga entre eles. Entretanto, as estruturas com α igual a 8° apresentaram valores mais altos do coeficiente de descarga, se comparadas às com 7° .

Com o intuito de avaliar a capacidade de escoamento do vertedouro labirinto, TULLIS *et al.* (2005) desenvolveram uma expressão que leva em conta o comprimento efetivo da crista do vertedouro (L) e o coeficiente de descarga.

$$q = \frac{Q}{W} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot \left(\frac{C_d \cdot L}{W} \right) \cdot H_t^{1.5} \quad (2.31)$$

A grandeza adimensional expressa no parêntese da equação acima, que corresponde a uma unidade de vazão para uma dada carga de operação, foi avaliada em função da relação H_t/P . Os resultados mostraram que, para as estruturas com perfil meia circunferência, os vertedouros com α igual a 7° apresentam um pequeno aumento da descarga, se comprados aos com α igual a 8° .

Finalmente, os autores concluem que o vertedouro labirinto com α igual a 8° e com perfil tipo ogiva se mostrou o mais eficiente, em relação ao coeficiente de descarga. As estruturas com perfil quarto de círculo foram consideradas menos eficientes quanto à aeração.

2.7 Oscilação da Lâmina Vertente

FALVEY (2003) afirma que as oscilações da lâmina vertente causam vibrações sobre vertedouros labirinto que operam com pequenas cargas, e mantém a formação de ondas ao longo do canal de descarga. Com o aumento da profundidade do escoamento, a lâmina torna-se espessa, a vibração cessa, e a aeração abaixo da lâmina é suprimida.

A vibração da lâmina pode causar ruídos desagradáveis e flutuações de pressão nas paredes da crista em labirinto. De acordo com NAUDASCHER e ROCKWELL (1994), *apud* FALVEY (2003), essas vibrações podem ser atribuídas à inadequada aeração da lâmina vertente. Entretanto, FALVEY (2003) afirma que a real causa das vibrações está ligada às instabilidades do fluxo, que gera um escoamento tridimensional sobre a crista.

HINCHLIFF e HOUSTON (1984), *apud* FALVEY (2003), recomendam a utilização de pilares inseridos sobre a crista do vertedouro com o intuito de diminuir a ocorrência de vibrações e reduzir a formação de ondas.

2.8 Canal de Descarga e Submersão

Segundo FALVEY (2003), a proposta do canal de descarga é transportar o escoamento do vertedouro até o leito original do rio. Para acelerar o escoamento e prevenir a submersão do vertedouro, esse canal é inserido ou feito em local que apresenta certa declividade, e qualquer mudança na disposição ou no alinhamento pode causar a formação de ondas supercríticas. Estas também podem ocorrer nos vértices de jusante da crista do vertedouro labirinto. BABB (1976), *apud* FALVEY (2003), verificou a formação dessas ondas supercríticas na seção de transição a jusante.

De acordo com FALVEY (2003) se o vertedouro labirinto for composto por um número de ciclos relativamente grande, comparado a largura do canal, as ondas supercríticas se interagem e o escoamento no canal de descarga comporta-se como uniforme. A colocação de difusores ou obstáculos ao longo do canal de descarga é uma solução adotada por muitos projetistas para diminuir a formação de ondas. Entretanto, o autor acredita que essas estruturas, geralmente dispostas na zona onde o escoamento é simétrico, não produzem efeito significativo sobre as ondas, sendo desaconselhável a sua utilização.

Alguns projetistas consideram que o uso de soleiras posicionadas entre as paredes de jusante pode acelerar o escoamento, entretanto, os efeitos causados por essas estruturas devem ser verificados. TAYLOR (1968), *apud* FALVEY (2003), afirma que a utilização dessas estruturas pode aumentar o risco de submersão da crista do vertedouro e diminuir sua capacidade de descarga. A fim de reduzir estes efeitos, como já citado anteriormente, FALVEY (2003) recomenda que o canal de descarga seja inserido em um local com devida inclinação, diminuindo a tendência de submersão e melhorando a aeração da crista do vertedouro.

No estudo realizado por TULLIS *et al.* (2007) foram desenvolvidas novas relações adimensionais da carga submersa, tanto para vertedouros labirinto, como para vertedouros lineares, com crista de perfil chanfrado. Segundo os autores, todas as vantagens descritas em inúmeros trabalhos relacionados à vertedouros labirinto,

resultam em uma gama de aplicações dessa estrutura, inclusive quando a submersão é um fator a ser considerado.

TULLIS *et al.* (2007) afirmam que estruturas como vertedouros labirinto de baixa carga de operação, instalados em canais levemente inclinados, ou onde o canal de jusante é restrito e/ou com muita vegetação, podem estar sujeitas a submersão.

Os vertedouros são normalmente projetados para condições de escoamento livre, na qual a superfície livre da água a jusante está abaixo da crista. Sob essas condições, a relação entre a carga e a vazão do vertedouro é governada principalmente pela geometria deste e pelas condições do escoamento no canal de aproximação. Quando o nível de água de jusante excede a elevação da crista, o vertedouro é submerso, sendo necessária uma maior carga de montante para a passagem do fluxo, para uma dada vazão, se comparado às condições de escoamento livre.

VILLEMONTÉ (1947), *apud* TULLIS *et al.* (2007), desenvolveu uma relação baseada no fator de redução do fluxo, que descreve os efeitos da submersão relativos a performance hidráulica de vertedouros lineares com crista de perfil chanfrado. Essa relação também foi utilizada em vertedouros labirinto, já que não existiam dados específicos para esses casos. Vários pesquisadores publicaram em seus estudos relações de submersão baseadas em um fator de redução de vazão (vazão do escoamento submerso/vazão do escoamento livre) para vertedouros lineares com perfil de crista chanfrado, em função da razão de submersão (carga piezométrica a jusante/carga piezométrica a montante).

TAYLOR (1968), *apud* TULLIS *et al.* (2007), verificou que o fator de amplificação da vazão para escoamento submerso era maior que esse mesmo fator para o escoamento livre, e concluiu que os efeitos causados pela submersão eram menos significantes em vertedouros labirintos do que em vertedouros lineares.

Através de testes realizados em três tipos de vertedouro labirinto com crista de perfil chanfrado, TULLIS *et al.* (2007) determinaram dois novos coeficientes adimensionais. O primeiro relaciona a carga total de jusante e de montante para as condições de escoamento livre (H_d/H_o), e o segundo determina o fator de amplificação da carga de montante (H^*/H_o), que relaciona a carga total em condições de submersão (H^*) e em condições de escoamento livre (H_o).

do nível de submersão, o nível de água a jusante se aproxima do nível de água de montante. Quando esse se iguala à carga total a montante, o vertedouro labirinto deixa de funcionar como uma estrutura de controle.

Os autores verificaram uma pequena variação nos efeitos de submersão entre estruturas com α igual a 7° , 8° e 20° . Quando este ângulo tende a 90° , o desempenho da estrutura submersa se aproxima daquele apresentado por um vertedouro linear.

As relações do parâmetro H_d/H_o desenvolvidas nesse estudo mostraram que: a) a submersão não inicia até que o nível de água de jusante exceda a crista do vertedouro; b) a carga total de montante não causou efeito significativo na submersão, até que esta represente mais que 50% da carga total de jusante; o maior nível de submersão ocorre quando a carga total de jusante é igual a de montante. As equações proposta por VILLEMONTÉ (1947), *apud* TULLIS *et al.* (2007), apesar de apresentarem bons resultados para vertedouros lineares, não prevêm com precisão a submersão para vertedouros labirinto (erro máximo = 22% e erro médio = 8,9%).

TULLIS *et al.* (2007) afirmam que a relação entre a vazão e a carga de um vertedouro labirinto submerso pode ser precisamente representada pelos parâmetros adimensionais propostos que relacionam a carga total de montante e de jusante, com a carga de montante associada ao escoamento livre e a vazão.

2.9 Sedimentação

FALVEY (2003) afirma que as características de sedimentação são muito importantes em vertedouros labirinto, para canais que carregam grandes quantidades de carga suspensa, ou para estruturas que possuem encosta erosiva a jusante. A preocupação com o assoreamento a montante é atribuída aos possíveis efeitos causados na capacidade de descarga de vertedouros labirinto. TAYLOR (1968), *apud* FALVEY (2003), constatou que com o aumento do fator de amplificação da crista (L/W), a influência da sedimentação na capacidade da estrutura é maior.

Os testes realizados por CASSIDY *et al.* (1985), no estudo do vertedouro labirinto Boardman, nos Estados Unidos, para verificação das conseqüências do depósito de material erosivo sobre o vertedouro, mostraram que esse efeito pode ser

negligenciado na avaliação da estrutura, já que esta é capaz de remover os sedimentos durante a ocorrência de grandes descargas.

2.10 Dissipação de Energia

O trabalho realizado por LOPES *et al.* (2006b) faz uma análise da energia específica residual em vertedouros labirinto. MAGALHÃES e LORENA (1994), *apud* LOPES *et al.* (2006b), realizaram estudos experimentais no LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Lisboa – Portugal) em vertedouros labirinto com crista com forma trapezoidal e perfil do tipo WES, inseridos em um canal horizontal e retangular. A partir das medições da vazão e da altura do escoamento a montante e a jusante, esses pesquisadores desenvolveram um ábaco que permite estimar a energia específica imediatamente a jusante da soleira (energia específica residual), apresentado na Figura 2.23. Realizaram também uma comparação entre os resultados obtidos por este ábaco e os apresentados pelos ensaios experimentais (modelo reduzido das Barragens de Teja e Koudiat). De acordo com os autores, a diferença apresentada nessa comparação pode ser atribuída às dificuldades então encontradas para uma medição rigorosa da altura do escoamento a jusante, devido às ondas transversais intensas e ao escoamento rápido naquela zona. Com os resultados experimentais obteve-se a seguinte equação de regressão ($r = 0.998$):

$$\frac{H_{jL}}{H_{mL}} = 0.571 + 0.254 \cdot \ln\left(\frac{H_t}{P}\right) + 0.199 \cdot \ln\left(\frac{L}{W}\right) \quad (2.35)$$

Sendo: H_{jL} - energia específica residual a jusante; H_{mL} – carga hidráulica a montante (medida em relação ao fundo do canal); H_t/P – relação entre a carga total sobre a crista e a altura da crista; L/W – fator de amplificação do desenvolvimento da crista.

A diferença relativa entre os resultados experimentais e os obtidos pela equação acima foram menores que 2%, exceto para valores de $H_t/P \leq 0.2$, em que o erro foi de 3% a 5%. Algumas observações foram feitas em relação ao comportamento da estrutura: com o aumento do parâmetro H_{jL}/H_{mL} , H_t/P também aumenta, principalmente para valores baixos destas relações; H_{jL}/H_{mL} aumenta ao passo que L/W aumenta, já que quanto maior este parâmetro, maior a vazão.

Os testes foram realizados com a energia específica residual adimensional (H_{jL}/H_{mL}) compreendida entre 0,16 e 0,85, correspondendo respectivamente às perdas de carga ($\Delta H/H_m$) de 0,84 e 0,15, o que confirma a elevada eficácia dos vertedouros labirinto na dissipação de energia, principalmente para pequenas cargas hidráulicas.

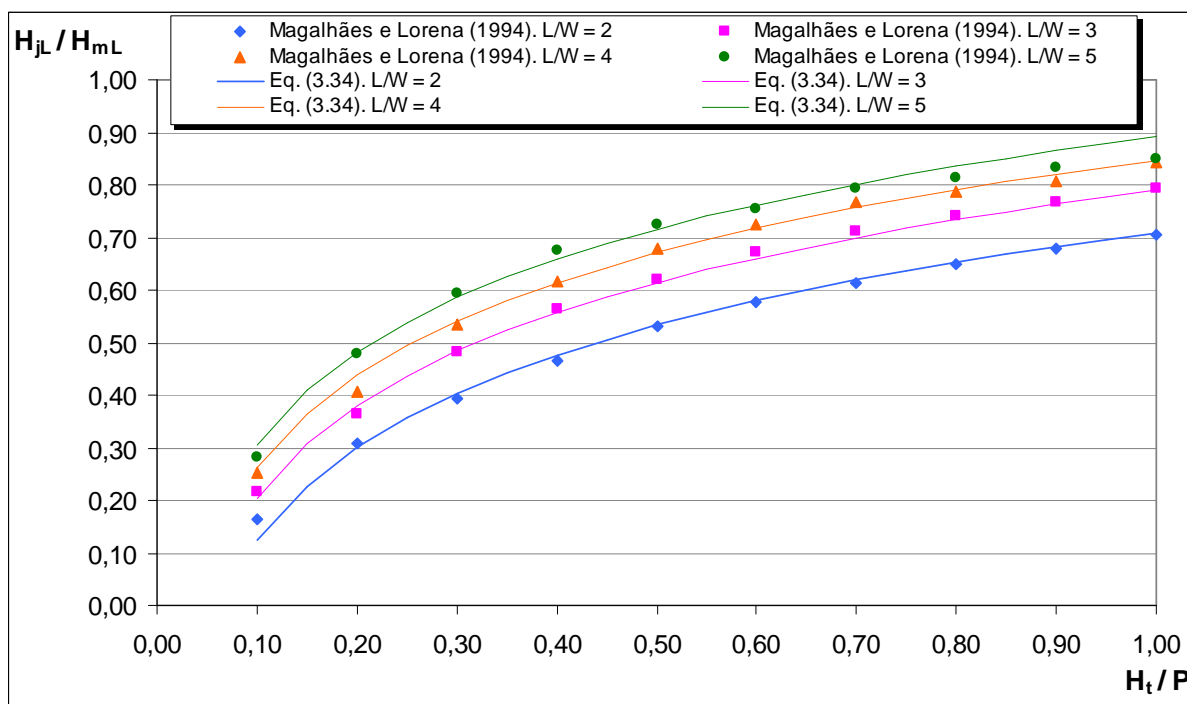


FIGURA 2.23 – ANÁLISE DA ENERGIA ESPECÍFICA RESIDUAL EM VERTEDOUROS LABIRINTO, APRESENTADA POR LOPES *et al.* (2006b).

LOPES *et al.* (2006b) realizaram ainda uma comparação entre a perda de carga do escoamento observada em vertedouros labirinto e em vertedouros de quedas verticais com soleira espessa horizontal. CHANSON (1994), *apud* LOPES *et al.* (2006b), desenvolveu uma equação para o cálculo da perda de carga do escoamento em quedas verticais a jusante de vertedouros com soleira espessa horizontal. CHAMANI e RAJARATNAM (1995), *apud* LOPES *et al.* (2006b), também propõem uma expressão para o cálculo da perda de carga nessas estruturas. Foram comparadas as perdas de carga obtidas pela formulação de MAGALHÃES e LORENA (1994), *apud* LOPES *et al.* (2006b), para diferentes valores de L/W , em função do parâmetro H_t/P , com as equações propostas por CHANSON (1994), *apud* LOPES *et al.* (2006b), e CHAMANI e RAJARATNAM (1995), *apud* LOPES *et al.* (2006b).

LOPES *et al.* (2006b) observaram que a perda de carga adimensional ($\Delta H/H_m$), em estruturas do tipo labirinto, é maior do que em vertedouros com quedas

verticais, independente de H_t/P e L/W , e em geral, com o aumento de H_t/P essa diferença torna-se mais acentuada. Essa relação é verificada visto que, para cargas elevadas, o comportamento de uma crista em labirinto se assemelha ao de uma crista espessa horizontal. Com o valor L/W elevado, ocorre um aumento da vazão e para idênticos valores de H_t/P essa diferença diminui.

O estudo propõe ainda a comparação dos métodos acima descritos relacionando a perda de carga adimensional, em função do parâmetro que envolve a altura crítica do escoamento e a altura da crista do vertedouro (h_c/P), para diferentes valores de L/W . Os resultados permitem igualmente verificar que a perda de carga adimensional em vertedouros labirinto é maior do que em vertedouros em queda livre, independente de H_t/P e L/W , sendo que essa diferença é acentuada com o aumento de h_c/P . Porém, observa-se menor influência de L/W na determinação da perda de carga adimensional, particularmente para $h_c/P > 0,6$.

LOPES *et al.* (2006b) concluem que, apesar dos resultados apresentados serem fisicamente plausíveis, é importante observar que nos ensaios realizados por MAGLHÃES e LORENA (1994), *apud* LOPES *et al.* (2006b), a localização da seção de medição da altura do escoamento a jusante do vertedouro pode não corresponder exatamente a seção de impacto do jato. Julga-se que essa localização depende da vazão e do fator de amplificação do escoamento da crista. Os resultados apresentados foram obtidos para vertedouros labirinto com crista de perfil do tipo WES, contudo, os autores afirmam que a comparação realizada por eles pode ser generalizada para todos os tipos de perfis, exceto para estruturas que operam com cargas muito pequenas.

2.11 Vertedouros Labirinto Existentes

Em seu manual, FALVEY (2003) apresenta os vertedouros labirinto existentes e suas características, mencionados e não mencionados pela literatura, até a publicação do ser livro (tabelas 2.2 e 2.3):

TABELA 2.2 – VERTEDOUROS LABIRINTO MENCIONADOS PELA LITERATURA (FALVEY, 2003).

NOME	PAÍS	ANO DE CONSTRUÇÃO	Q (m³/s)	H _d (m)	P (m)	W (m)	L (m)	N (ciclos)	FONTE
Água Branca	Portugal	-	124,00	1,65	3,50	12,50	28,00	2	Quintel et al (2000)
Alfaiates	Portugal	1999	99,00	1,60	2,50	13,20	37,50	1	Quintel et al (2000)
Alijo	Portugal	1991	52,00	1,23	2,50*	8,70	21,05	1	Magalhães (1989)
Arcossó	Portugal	2001	85,00	1,25	2,50	13,30	16,68	1	Quintel et al (2000)
Avon	Austrália	1970	1420,00	2,16	3,00	13,50	26,50	10	Darvas (1971)
Barletts Ferry	EUA	1983	5920,00	2,19	3,43	18,30	70,30	20,5	Mayer (1980)
Belia	Zaire	-	400,00	2,00	3,00/2,00	18,00	31,00	2	Magalhães (1989)
Beni Bahdel	Argélia	1944	1000,00	0,50	-	4,00	62,50	20	Afshar (1988)
Boardman	EUA	1978	387,00	1,77	2,76*	18,30	53,50	2	Babb (1976)
Calde	Portugal	2001	21,00	0,60	2,50	7,40	28,19	1	Quintel et al (2000)
Carty	EUA	1977	387,00	1,80	2,80/4,30	18,30	54,60	2	Afshar (1988)
Cimia	Itália	1982	1100,00	1,50	15,50	30,00	87,50	4	Lux e Hinchliff (1985)
Dungo	Angola	1985	576,00	2,40	4,30	9,70	28,60	4	Lux (1989)
Estancia	Venezuela	1967	661,00	3,01	-	32,00	65,00	1	Magalhães (1989)
Foresport	EUA	1988	76,00	1,02	2,94	6,10	21,90	2	Lux (1989)
Garland Canal	EUA	1982	22,50	0,37	1,40	4,57	16,90	3	Lux e Hinchliff (1985)
Gema	Portugal	-	115,00	1,12	3,00*	12,50	30,00	2	Quintel et al (2000)
Harrezza	Argélia	1983	350,00	1,90	3,50*	9,70	28,60	3	Lux (1989)
Hyrum	EUA	-	256,00	1,68	3,66	9,10	45,70	2	Lux (1989)
Influente	Moçambique	1985	60,00	1,00	1,60	4,15	24,76	3	Magalhães (1989)
Juturnaíba	Brasil	1983	862,00	0,70	-	-	-	-	Afshar (1988)
Keddera	Argélia	1985	250,00	2,46	3,50*	8,90	26,30	2	Lux (1989)
Kizilcapinar	Turquia	-	2270,00	4,60	4,00	75,40	263,90	5	Yildiz (1996)
Mercer	EUA	1972	239,00	1,83	4,57	5,49	17,60	4	CH2M Hill (1976)
Navet	Trinidad	1974	481,00	1,68	3,05	4,59	12,80	10	Phelps (1974)
Ohau C. Canal	Nova Zelândia	1980	540,00	1,08	2,50	6,25	37,50	12	Walsh (1980)
Pacoti	Brasil	1980	3400,00	2,72	4,00	8,00	41,52	15	Magalhães (1989)
Pisão	Portugal	-	50,00	1,00	3,50	8,00	200,00	1	Quintel et al (2000)
Quincy	EUA	1973	26,50	2,13	3,96	13,60	26,50	4	Magalhães (1989)
Ritschard	EUA	**	1555,00	2,74	3,05	83,80	411,00	9	Vermeyen (1991)
Rollins	EUA	**	1841,00	2,74	3,34	-	472,00	9	Tullis (1995)
Saco	Brasil	1986	640,00	1,50	-	45,00	248,50	-	Quin et al (1988)
S. Domingos	Portugal	1993	160,00	1,84	3,00*	7,50	22,53	2	Magalhães (1989)
Sam Rayburn Laki	EUA	1996	***	-	6,10	195,10	526,70	16	USCOLD Bulletin (1994)
Santa Justa	Portugal	-	285,00	1,35	3,00	10,50	67,40	2	Lux (1989)
Sarioglan	Turquia	-	490,70	1,06	3,00	70,00	358,40	7	Yildiz (1996)
Sarno	Argélia	1952	360,00	1,50	6,00	-	27,90	8	Afshar (1988)
Teja	Portugal	1995	61,00	1,05	2,00	12,00	36,00	1	Quintel et al (2000)
Ute	EUA	1983	15570,00	5,79	9,14	18,30	73,70	14	Lux (1989)
Woronora	Austrália	1941	1020,00	1,36	2,13	13,41	31,23	11	Afshar (1988)

TABELA 2.3 – VERTEDOUROS LABIRINTO NÃO MENCIONADOS PELA LITERATURA (FALVEY, 2003).

NOME	PAÍS	ANO DE CONSTRUÇÃO	Q (m³/s)	H _d (m)	P (m)	W (m)	L (m)	N (ciclos)	Localização
Flamingo	EUA	1990	1591	2,23	7,32	95,1	67,4	4	Las Vegas, NV
Tongue River	EUA	-	-	-	-	-	-	-	Decker, MT
Twin Lake	EUA	1989	570	2,74	3,35	8,31	34,05	4	Buffalo, WY

* A soleira possui uma certa declividade. Neste quadro esta apresentada a mínima dimensão dos ápices de montante;

** Outro modelo de vertedouro foi construído;

*** Os valores da carga de operação e da vazão são restritos ao Departamento do Exército Americano após os acontecimentos de 11 de Setembro de 2001

Como pode ser observado na tabela 2.2, FALVEY (2003) faz referência a três vertedouros labirinto construídos no Brasil. A figura 2.24 mostra o vertedouro labirinto da Barragem Juturnaíba, localizada no município de Silva Jardim no estado do Rio de Janeiro.



FIGURA 2.24 – VERTEDOURO LABIRINTO DA BARRAGEM JUTURNAÍBA(RJ). FONTE: GOOGLE™ EARTH.

Além da Barragem Pacoti, referenciado por FALVEY (2003), há referências de outros dois vertedouros labirinto construídos no estado do Ceará, nas Barragens Rosário (figura 2.25) e Pacajus (figuras 2.26 e 2.27).



FIGURA 2.25 – VERTEDOURO LABIRINTO DA BARRAGEM ROSÁRIO (CE). FONTE: GOOGLE™ EARTH.



FIGURA 2.26 – VISTA DO LAGO DA BARRAGEM PACAJUS (CE), O VERTEDOURO LABIRINTO ENCONTRA-SE NA MARGEM ESQUERDA.

FONTE: COGERH – COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ.



FIGURA 2.27 – VISTA DO VERTEDOIRO DE PACAJUS (CE) E DO CANAL DE RESTITUIÇÃO A JUSANTE.
FONTE: COGERH – COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ.

Recentemente foi finalizada a construção de mais um vertedouro labirinto no Brasil (figura 2.28). A PCH Bocaiúva está localizada no Rio Cravari, no município de Brasnorte, no estado do Mato Grosso. A estrutura foi projetada pelo Consórcio COPEB e executada pela DM Construtora.



FIGURA 2.28 – VERTEDOIRO LABIRINTO DA PCH BOCAIÚVA (MT). FONTE: DM CONSTRUTORA DE OBRAS LTDA.

3 CAPÍTULO III – ANÁLISE CRÍTICA: CASO PILOTO – PCH BOCAIÚVA

A revisão bibliográfica revelou que há um bom material que serve de base para a pesquisa proposta. Entretanto, há lacunas importantes a serem preenchidas em termos da capacidade de descarga dos vertedouros labirinto. A limitação da altura dos vertedouros labirinto também é um assunto a investigar. É também notável o aspecto aeração em termos de melhorar o desempenho do vertedouro e a qualidade da água vertida.

Contatou-se a existência de informações e parâmetros necessários para o projeto de vertedouros labirinto. Entretanto, para casos específicos, muitos estudos aconselham a utilização de um modelo físico para avaliar o comportamento dessa estrutura.

Para elaboração de critérios de projeto, é necessário avaliar a consistência de todos os parâmetros propostos, em conjunto com uma análise técnica e econômica.

Inicialmente foi realizada uma análise crítica do projeto do Vertedouro Labirinto da PCH Bocaiúva, levando em conta principalmente as dimensões da estrutura. Esta avaliação permite a criação de propostas que tornem a utilização deste tipo de vertedouro mais eficiente e economicamente viável. A presente pesquisa buscou analisar o projeto e o comportamento do da estrutura, localizada no rio Cravari, no município de Brasnorte/MT. O estudo em modelo reduzido desse vertedouro foi realizado pelo LACTEC/CEHPAR, no ano de 2008.

Construído na escala geométrica 1:40 e operado segundo o critério de semelhança de Froude (escala de vazão – 1:10119 e escala de velocidade – 1:6,32), o modelo foi construído de acordo com o projeto do vertedouro labirinto desenvolvido pelo Consórcio COPEB.

No estudo foram efetuados cinco testes com as vazões e níveis de jusante previamente estabelecidos, com o objetivo de determinar a capacidade de descarga do vertedouro, através da medição dos níveis de água do reservatório, e também verificar o processo de dissipação de energia dessa estrutura.

3.1 Dimensões e Características do Vertedouro

De acordo com o projeto fornecido pela empresa contratante, as principais dimensões da estrutura estão listadas a seguir (valores de protótipo). A figura 3.1

ilustra dois ciclos, dos 12 ciclos da crista em labirinto do vertedouro da PCH Bocaiúva.

- Espessura da parede: $t = 0,65$ m;
- Altura da crista: $P = 4,00$ m;
- Ângulo formado na direção do escoamento: $\alpha = 20^\circ$;
- Ângulo formado na direção do escoamento - máximo: $\alpha_{m\acute{a}x} = 31,40^\circ$;
- Lado interno do vértice (montante): $A = 0,86$ m;
- Lado interno do vértice (jusante): $A = 1,98$ m;
- Lado externo do vértice (montante): $D = 1,98$ m;
- Lado externo do vértice (jusante): $D = 3,10$ m;
- Número de ciclos: $N = 12$;
- Comprimento do braço: $L_1 = 5,32$ m;
- Comprimento efetivo do braço: $L_2 = 4,76$ m;
- Comprimento total da crista em labirinto: $L = 175,20$ m;
- Comprimento efetivo da crista em labirinto: $L_e = 148,31$ m;
- Comprimento do trecho reto: $L_{reto} = 3,95$ m;
- Comprimento do Vertedouro na direção do escoamento: $B = 5,80$ m;
- Largura de um ciclo: $w = 7,60$ m;
- Largura total da crista em labirinto: $W = 91,20$ m;
- Largura total da crista (labirinto e trecho reto): $W_{total} = 95,14$ m

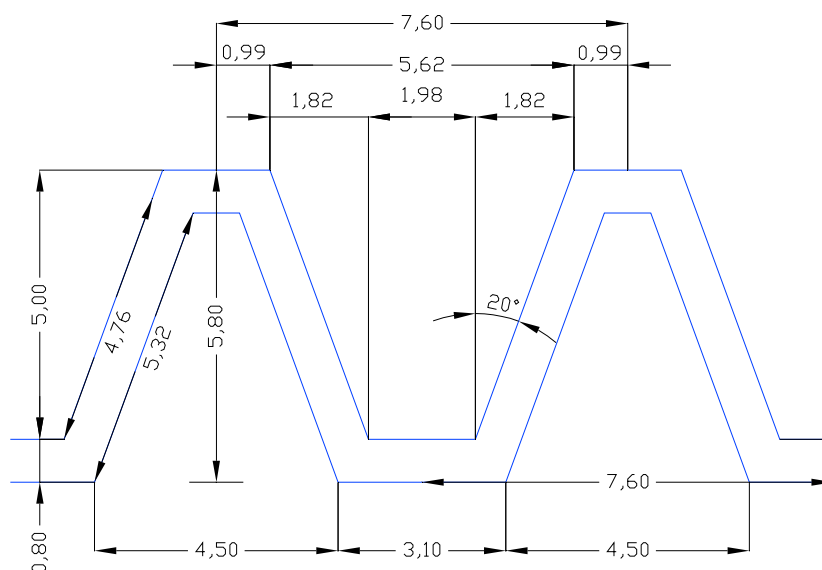


FIGURA 3.1 – PRINCIPAIS DIMENSÕES DO VERTEDOURO LABIRINTO PROJETADO.

Baseados nos dados de protótipo fornecidos pela empresa contratante foram realizados cinco testes, nos quais foram impostos o nível de água a jusante do vertedouro e a vazão. Através da leitura do nível de água do reservatório, obteve-se a carga hidráulica para cada uma das cinco vazões conforme tabela abaixo.

TABELA 3.1 – DADOS DOS TESTES REALIZADOS.

Teste	TR (Anos)	Dados Impostos		Dados Calculados
		Vazão (m³/s)	NAR (m)	Carga Hidráulica (m)
1	-	112	311,50	0,50
2	2	283	311,94	0,94
3	10	435	312,29	1,29
4	50	586	312,54	1,54
5	1000	868	313,11	2,11

A partir desses dados e das dimensões da crista em labirinto do vertedouro projetado, pode-se calcular os parâmetros de dimensionamento:

- $w/P = 1,90$;
- $A/w = 0,113$ (montante);
- $A/w = 0,2605$ (jusante);
- $L/W = 1,92$;
- $\alpha/\alpha_{máx} = 0,637$;
- H_t/P (para cada teste a carga hidráulica H varia):
 - Teste 1 = 0,13;
 - Teste 2 = 0,24;
 - Teste 3 = 0,32;
 - Teste 4 = 0,39;
 - Teste 5 = 0,54;

Observações

- H_t/P está dentro da faixa proposta pela maioria dos estudos presentes na bibliografia ($0,1 \leq H_t/P \leq 0,9$). Vale ressaltar que quanto menor essa relação, maior será a performance do vertedouro labirinto (HAY e TAYLOR – 1970);

- TULLIS *et al.* (1995) recomendam que a espessura da parede da crista seja igual a um sexto da altura dessa ($t = P/6$). No presente projeto t apresenta um valor maior compatível com a referência ($P/6 = 0,67$ m).
- O ângulo formado na direção do escoamento (α) é igual a 20° , e portanto não está compreendido entre 7° e 16° , faixa de variação proposta por TULLIS *et al.* (1995). Este limite reflete em estruturas com um maior comprimento efetivo do vertedouro, garantindo sua eficiência e menor custo. O critério proposto sugere que a escolha de α deve manter o comprimento e a largura em proporções adequadas.
- O parâmetro w/P também está fora da faixa de variação limitada na bibliografia (o parâmetro w/P deve ser mantido entre 3 e 4). Essa relação não deve atingir valores muito pequenos, já que, nesses casos, o vertedouro passa a ser constituído por pequenos ciclos que são ignorados pelo escoamento (HAY e TAYLOR – 1970). De acordo com LUX (1989), altos valores desse parâmetro resultam em grandes estruturas, sem ganhos em sua performance. Valores w/P menores que 2 não devem ser utilizados, pois diminuem rapidamente o desempenho do vertedouro.
- HAY e TAYLOR (1970) afirmam que a relação L/W é proporcional ao desempenho do vertedouro. Quanto maior esse valor, maior também será a relação Q_L/Q_N (designada por esses autores como performance do vertedouro). Geralmente esse fator está compreendido entre 2 e 5. LUX (1989) afirma que para valores de L/W maiores que 6, o acréscimo de performance é pequeno, exceto para estruturas que operaram com pequenas cargas. Para valores menores que 2, o uso do vertedouro de soleira plana e retilínea prova ser mais econômico. O projeto do vertedouro labirinto de Bocaiúva apresenta L/W igual a 1,92.
- Outra relação proposta por LUX (1989) diz respeito ao parâmetro A/w . De acordo com o autor, para a máxima performance da estrutura, o menor valor desse parâmetro deve ser adotado para o projeto, o que representa a tendência ao formato triangular. Para grandes valores de A/w , uma grande interferência pode limitar o desempenho do vertedouro. Plantas trapezoidais com A/w igual ou menor que 0,0765 podem ser utilizadas sem grandes perdas de performance.

- De acordo com HAY e TAYLOR (1970), ao passo que $\alpha/\alpha_{m\acute{a}x}$ aumenta, o desempenho do vertedouro também aumenta, pois o vertedouro se aproxima do formato triangular, em planta. Os autores recomendam que esse parâmetro não deve ser menor que 0,75.
- No manual apresentado por FALVEY (2003) são colocadas algumas das principais estruturas compostas por vertedouros labirinto. Observa-se que a maioria dos casos existentes apresenta os parâmetros de dimensionamento dentro das faixas de variação descritas anteriormente. O autor ainda compara os coeficientes de descarga dessas estruturas com os teóricos obtidos pelo método de TULLIS *et al.* (1995). Verifica-se que os vertedouros que possuem esses parâmetros fora das faixas de dimensionamento apresentaram uma diferença percentual relativamente alta.

O trabalho recente realizado por PAXSON e SAVAGE (2006) verificou que a faixa de dimensionamento do parâmetro w/P , fixada entre 3 e 4, deve ser reconsiderada. Em seus estudos, os autores observaram que o aumento da altura da crista (P) gera um acréscimo de performance do vertedouro labirinto, mesmo mantendo o valor da largura de um ciclo da crista (w), ou seja, diminuindo a relação w/P . Utilizando o método de TULLIS *et al.* (1995) e LUX e HINCHLLIFF (1985) de dimensionamento, para uma mesma carga, estruturas com w/P igual a 1,5 apresentaram vazões maiores. O vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva apresenta w/P igual a 1,90 e, segundo os principais estudos, está fora da faixa de dimensionamento que confere a estrutura maior eficiência. Este parâmetro deve ser melhor estudado, visto que a pesquisa preliminar realizada por PAXSON e SAVAGE (2006) apresentou resultados que não confirmam as considerações colocadas por HAY e TAYLOR (1970) e LUX (1989). É importante ressaltar que as curvas de dimensionamento de vertedouros labirinto presentes na bibliografia limitam o parâmetro w/P , e segundo os autores, a utilização destas não é apropriada para casos em que $w/P \leq 2$.

O parâmetro proposto por FALVEY (2003) calcula a eficiência de um vertedouro labirinto, verificando quantas vezes maior é o desempenho dessa estrutura, se comparada a um vertedouro linear, considerando as mesmas condições e dimensões de projeto. Para o cálculo, foi aplicada a equação 2.24, que relaciona o coeficiente de descarga para o vertedouro labirinto para dado valor de α

e o coeficiente de descarga para um vertedouro retilíneo com α igual a 90° , calculados pelas equações propostas por TULLIS *et al.* (1995), e o fator de amplificação da crista (L/W).

A seguir estão relacionadas as respectivas eficiências do vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva, calculadas para os cenários propostos pela empresa contratante:

TABELA 3.2 – EFICIÊNCIA DO VERTEDOIRO LABIRINTO DA PCH BOCAIÚVA EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO H_t/P .

Teste	Vazão (m ³ /s)	H_t/P	$C_d(20^\circ)$	$C_d(90^\circ)$	L/W	ε
1	112	0,13	0,607	0,637	1,92	1,83
2	283	0,24	0,638	0,712	1,92	1,72
3	435	0,32	0,632	0,743	1,92	1,63
4	586	0,39	0,616	0,755	1,92	1,57
5	868	0,54	0,568	0,759	1,92	1,44

Comparando os resultados acima com os apresentados pela bibliografia, esse parâmetro fica abaixo da média verificada nos vertedouros labirinto existentes, aproximadamente igual a 2. É interessante observar que a eficiência também é função do parâmetro L/W . Como já foi apresentado anteriormente, o fator de amplificação da crista do vertedouro labirinto de Bocaiúva fica fora das faixas de dimensionamento propostas pela maioria dos autores.

A partir dos procedimentos de projeto propostos por TULLIS *et al.* (1995) é possível compor diferentes *layouts* para a crista em labirinto. Considerando que o canal em que está inserido o vertedouro da PCH Bocaiúva possui largura (W) igual 95,14 m, e partindo da altura da crista (P) igual 4,00 m, por exemplo, podem ser criadas várias propostas para que os parâmetros de dimensionamento estabelecidos na literatura fiquem dentro dos limites estipulados. Entretanto, variando o número de ciclos, e o ângulo α , a fim de encontrar um *layout* que aumente a eficiência, chegamos a valores de B (comprimento do vertedouro na direção do escoamento) muito maiores que 5,80 metros, dimensão original do projeto. Se considerarmos que B está limitado a esse valor, verificamos que, mesmo utilizando as equações propostas por TULLIS *et al.* (1995), encontramos um *layout* muito parecido com o original, não alcançando as faixas estabelecidas para os principais parâmetros de dimensionamento.

Além das características relativas às dimensões em planta do vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva, é interessante observar o perfil da crista utilizado. No projeto foi determinado a uso do perfil tipo WES adaptado por MAGALHÃES (1983), como ilustrado na figura 3.2.

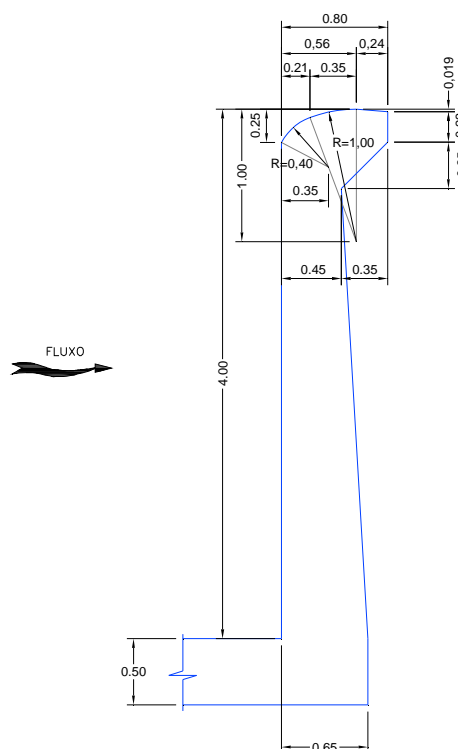


FIGURA 3.2 – PERFIL DA CRISTA DO VERTEDOIRO LABIRINTO PROJETADO PARA PCH BOCAIÚVA.

É importante observar que, para estimar o coeficiente de descarga de estruturas com perfil tipo WES, é necessário utilizar o ábaco desenvolvido no estudo de MAGALHÃES e LORENA (1989). O inconveniente observado está relacionado à faixa de dimensionamento dos parâmetros. Para o uso dessas curvas de dimensionamento (Figura 3.3), é necessário que L/W esteja compreendido entre 2 e 5 e w/P seja maior que 2,5. Nenhuma dessas condições é verificada no vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva.

Os outros dois principais métodos presentes na bibliografia para estimar o coeficiente de descarga, TULLIS *et al.* (1995) e LUX e HINCHLIFF (1985), também apresentam faixas de dimensionamento que não incluem os valores dos parâmetros L/W e w/P apresentados. Além disso, esses dois métodos foram desenvolvidos para cristas em perfil quarto de círculo.

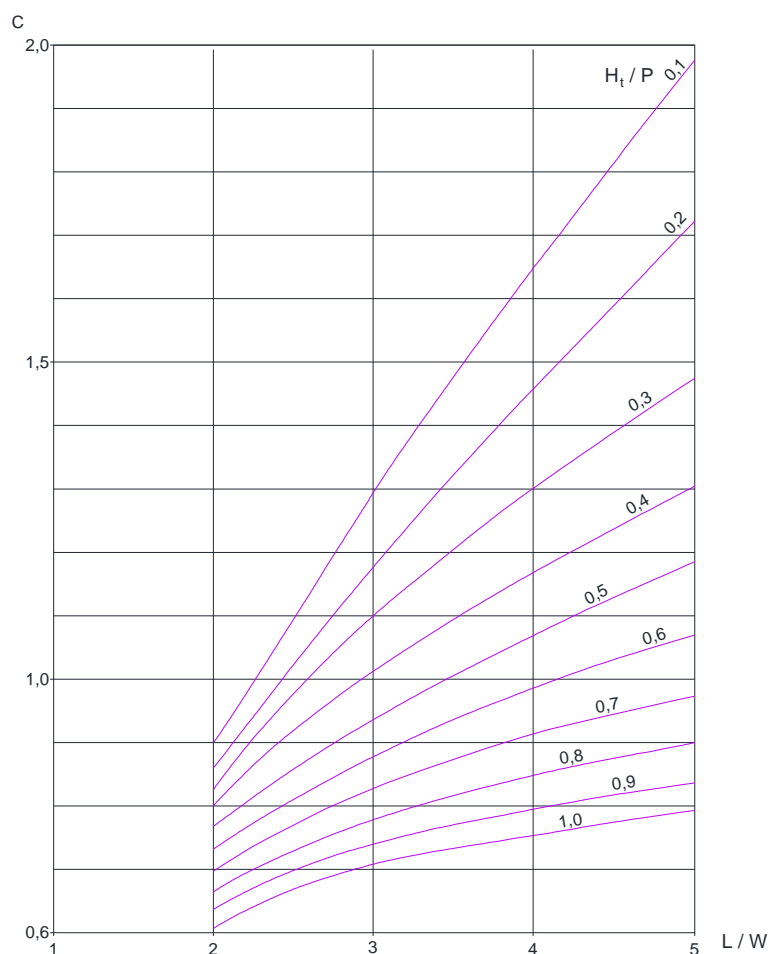


FIGURA 3.3 – ÁBACO DESENVOLVIDO POR MAGALHÃES E LORENA (1989) PARA ESTIMAR O COEFICIENTE DE DESCARGA EM VERTEDOUROS LABIRINTO COM CRISTA EM PERFIL TIPO WES.

Para a análise da interferência da lâmina vertente, FALVEY (2003) propõe o uso da equação 2.26, desenvolvida experimentalmente por INDLEOKOFFER E ROUVÉ (1975), que avalia o comprimento de interferência da lâmina.

FALVEY (2003) ainda recomenda a utilização de um novo parâmetro de dimensionamento que relaciona esse comprimento de interferência e o comprimento do braço do vertedouro. Recomenda-se que L_{de}/L_1 seja menor ou igual a 0,3. Segundo o autor, para valores dessa relação maiores que 0,5, a redução no coeficiente de descarga é enorme, diminuindo muito a eficiência do vertedouro labirinto. A tabela 3.3 relaciona esse parâmetro aos respectivos cenários propostos pela empresa contratante:

TABELA 3.3 – PARÂMETRO L_{de}/L_1 EM FUNÇÃO DA CARGA H_t

Teste	Vazão (m³/s)	H_t (m)	L_{de} (m)	L_1 (m)	L_{de}/L_1
1	112	0,51	1,094	5,320	0,206
2	283	0,95	2,050	5,320	0,385
3	435	1,30	2,797	5,320	0,526
4	586	1,56	3,361	5,320	0,632
5	868	2,14	4,615	5,320	0,868

Observa-se que na maioria dos testes realizados, o parâmetro adimensional proposto ultrapassou o limite observado por FALVEY (2003), alcançando um valor muito alto para o cenário de máxima vazão de projeto.

Foi verificado que o escoamento a jusante do vertedouro da PCH Bocaiúva é bastante complexo, podendo ter alterações de pressão. Foi observada ainda, a deficiência da aeração junto à crista, condição que pode estabelecer uma pressão sub-atmosférica a jusante do vertedouro. Essa condição pode estar atrelada a interferência da lâmina vertente, que ocorre em grande parte da crista do vertedouro, causada pelos problemas relativos à geometria em planta da estrutura.

3.2 Considerações a Respeito do Vertedouro Labirinto da PCH Bocaiúva

Observou-se que a estrutura projetada apresenta geometria em planta em desacordo com os principais parâmetros de dimensionamento presentes na bibliografia. Verificou-se que os coeficientes de descargas estimados provavelmente não estão corretos. A utilização do método de TULLIS *et al.* (1995) não é adequada para esse estudo, já que o vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva apresenta perfil da crista do tipo WES e parâmetros fora das faixas de dimensionamento propostas.

A grande interferência da lâmina vertente, causada pela geometria da crista do labirinto projetado, pode reduzir significativamente o coeficiente de descarga. O aumento do desempenho gerado pelo vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva foi muito pequena, se comparada aos principais casos presentes na literatura. Entretanto, a estrutura alcançou os resultados esperados, apresentando uma capacidade de descarga maior que um vertedouro convencional. Se as condições do local não apresentam limitações físicas em relação ao comprimento do vertedouro na direção do escoamento, outros *layouts* poderiam ser criados a fim de encontrar

uma configuração que gere maior eficiência, e consequentemente maior capacidade. É necessária a realização de um estudo que relacione os ganhos de performance e o aumento dos custos, a fim de verificar se a adoção de um vertedouro labirinto é realmente uma proposta mais econômica e eficaz para esse caso.

Através desta análise, foi possível verificar que a maioria dos parâmetros propostos na bibliografia são consistentes, e estruturas que os possuem fora das faixas de dimensionamento propostas, apresentam efetiva perda de performance e eficiência, além de problemas como falta de aeração e interferência da lâmina. Entretanto, observa-se a necessidade de uma avaliação mais completa dos limites propostos para w/P , já que SAVAGE e PAXSON (2006) apresentaram resultados divergentes dos principais métodos de dimensionamento existentes na bibliografia.

4 CAPÍTULO IV: ESTUDOS EM CANAL PRISMÁTICO RETANGULAR

4.1 Alternativas de Perfil de Crista

Como apresentado no Capítulo II – Revisão Bibliográfica – existe vários tipos de perfis de crista que podem ser utilizados em vertedouros labirinto. Grande parte dos pesquisadores afirma que o tipo de perfil da crista tem baixa influência na capacidade de descarga da estrutura. Entretanto, não há na bibliografia estudos experimentais específicos que comparam o comportamento das estruturas com diferentes perfis.

Dessa forma, ainda com o intuito de criar critérios de projeto para o dimensionamento de vertedouros labirinto, foi realizado um estudo experimental que compara a capacidade de descarga de quatro diferentes tipos de perfis: plano, chanfrado, quarto de circunferência, e tipo WES (*Waterways Experiment Station*) adaptado por MAGALHÃES (1989).

Os testes foram realizados em laboratório, em um canal horizontal com seção retangular (0,39 x 0,50 m), com 7,0 m de comprimento (figura 4.1), alimentado por um reservatório de nível constante, e com vazão controlada por uma válvula gaveta. A medição da descarga foi efetuada através de um orifício padrão calibrado, inserido no conduto de alimentação. Finalmente, o nível de água a montante foi controlado através de uma ponta limnimétrica instalada a 0,50 m a montante da crista da estrutura, conforme mostrado na figura 4.3.



FIGURA 4.1 – CANAL DO LABORATÓRIO DIDÁTICO DE HIDRÁULICA UTILIZADO NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.

As cristas projetadas foram construídas em acrílico, e instaladas sob uma base também de acrílico inserida no canal. A estrutura foi cuidadosamente nivelada, já que pequenas variações na elevação da crista podem trazer erros significativos. A figura 4.2 ilustra os perfis utilizados nos testes.

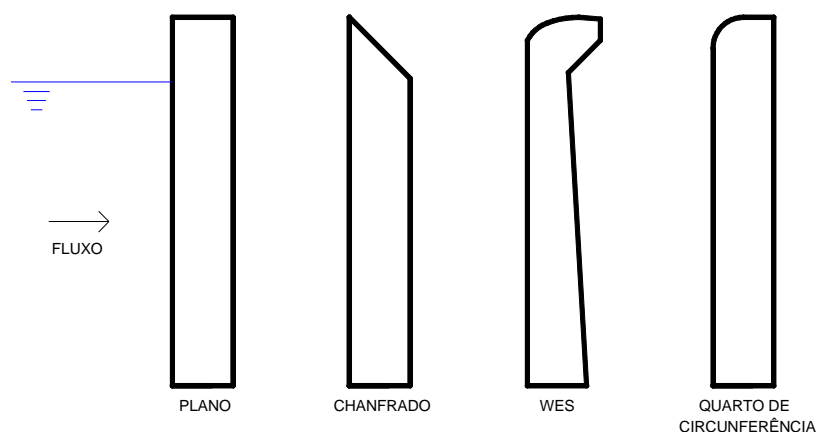


FIGURA 4.2 – PERFIS DE CRISTA UTILIZADOS NOS TESTES.

O critério utilizado na determinação da escala do modelo levou em conta as limitações físicas do canal e a necessidade de serem representados valores da relação H/P significativos. Para tanto, a escala foi definida como 1:20. Fixadas em uma base de 10 cm de altura, as cristas analisadas possuem a altura (P) igual a 20 cm, e representaram o cenário de $0,1 \leq H/P \leq 0,70$.

A espessura da parede das cristas (t) foi determinada como $1/6$ da altura da parede ($t = 1/6.P = 3,33$ cm), conforme o critério de TULLIS *et al.* (1995), para os perfis plano, chanfrado e quarto de circunferência. Para o perfil WES, a espessura t foi mantida igual ao projeto original do caso piloto, igual a 0,65 m (dados de protótipo), na escala utilizada no laboratório t foi fixado como 3,25 cm.

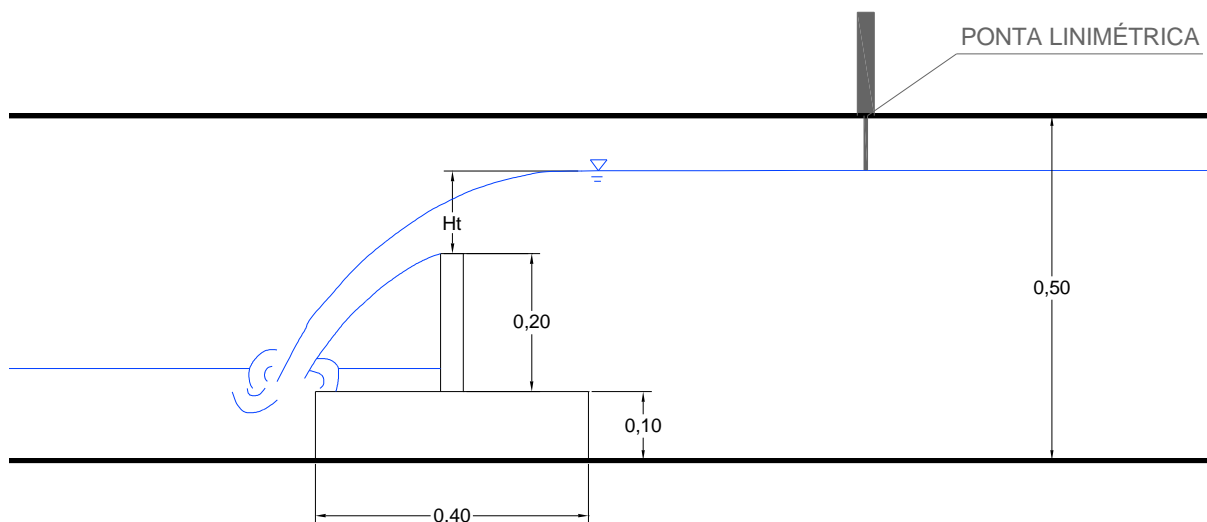


FIGURA 4.3 – CROQUI DA INSTALAÇÃO DOS TESTES REALIZADOS NO CANAL DO LABORATÓRIO (DESENHO EM m).

O método utilizado no estudo experimental consistiu na imposição da carga a 0,50 m a montante da crista analisada, e leitura da vazão para dada altura da lâmina de água. Levando em conta as limitações físicas do canal do laboratório, a carga máxima imposta foi de 14,0 cm, que representa $Ht/P = 0,7$. Considerando que vertedouros labirinto não são apropriados em estruturas que operem em situações em que Ht/P é maior que 0,90, essa limitação não interferiu na qualidade dos resultados.

Verificou-se que em todos os testes, a partir de certa carga (variável de acordo com a crista analisada), a estrutura apresenta problemas de aeração. Nesses casos, foi utilizado um dispositivo para ventilação e consequente aeração da lâmina de água. Para a mesma vazão foram determinadas as diferenças entre os níveis a montante da crista para lâminas aeradas e não aeradas.

Inicialmente foram realizadas as leituras de vazão para as cargas impostas a montante da crista (sem utilizar nenhum instrumento para aeração), de acordo com a tabela 4.1:

TABELA 4.1 – CARGAS IMPOSTAS 50 CM A MONTANTE DA CRISTA.

TESTE	CARGA – H_t (cm)	H_t / P
1	2	0,10
2	4	0,20
3	6	0,30
4	8	0,40
5	10	0,50
6	12	0,60
7	14	0,70

Nos testes em que a lâmina de água tornava-se não aerada, a vazão observada para a carga imposta foi mantida, e em seguida foi instalado um tubo como mecanismo de ventilação. Uma nova leitura da altura da lâmina de água foi realizada a fim de encontrar o coeficiente de descarga para a condição aerada.

Os resultados obtidos nos estudos realizados em laboratório estão apresentados nos itens a seguir.

4.1.1 Crista Retilínea – Perfil Plano

O perfil plano não é comumente utilizado em vertedouros. Apesar de apresentar facilidade na construção, esse perfil utiliza maior volume de concreto e pode reduzir significativamente o coeficiente de descarga.

Como apresentado, os testes foram realizados no canal do laboratório, no qual era imposta a carga (H_t) sobre a crista, e posteriormente era realizada a leitura da vazão (Q) correspondente. Sendo L a largura do canal do laboratório, igual a 0,39 m, e através dos dados de vazão e carga sobre a crista, o coeficiente de descarga C é calculado pela equação 4.1:

$$Q = C \cdot L \cdot H_t^{3/2} \quad (4.1)$$

A tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos nos testes realizados no perfil plano, sem tubo para aeração.

TABELA 4.2 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO PERFIL PLANO, SEM TUBO DE AERAÇÃO.

Teste	H_t (cm)	H_t / P	Q (l/s)	C
1	2	0,10	2,13	1,931
2	4	0,20	5,65	1,811
3	6	0,30	11,50	2,006
4	8	0,40	19,40	2,198
5	10	0,50	27,80	2,254
6	12	0,60	37,30	2,301
7	14	0,70	45,30	2,217

Como pode ser observado, o coeficiente de descarga verificado no primeiro teste foi superior ao verificado no segundo teste. Para carga igual a 2 cm (teste 1), observou-se a lâmina de água aderente a parede da crista (pressão acima da atmosférica), o que aumentou o coeficiente de descarga. Com o aumento da descarga, a lâmina de água desprende-se da parede do vertedouro e alcançou a condição atmosférica. O contínuo aumento da vazão gerou instabilidade da lâmina que tornou-se parcialmente aerada e instável, para $H_t/P = 0,3$. Para $H_t/P > 0,3$, a lâmina de água torna-se totalmente não aerada. Essa condição implica em pressões negativas que aumentam o coeficiente de descarga. Como apresentado no Capítulo II – Revisão Bibliográfica – a pressão subatmosférica aumenta a taxa de vazão, mas pode criar problemas estruturais devido à vibração e à ressonância.

A tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados com a lâmina de água aerada através do dispositivo de ventilação. Observa-se uma redução no coeficiente de descarga devido ao aumento do nível de água a montante da crista.

A figura 4.4 compara os coeficientes de descarga observados no escoamento aerado e não aerado.

TABELA 4.3 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO PERFIL PLANO, COM TUBO DE AERAÇÃO.

Teste	Carga – H_t (cm)	H_t / P	Vazão – Q (l/s)	C
1	2,16	0,108	2,13	1,720
2	4,00	0,200	5,65	1,811
3	6,10	0,305	11,50	1,957
4	8,65	0,433	19,40	1,955
5	10,97	0,549	27,80	1,962
6	13,29	0,665	37,30	1,974
7	15,04	0,752	45,30	1,991

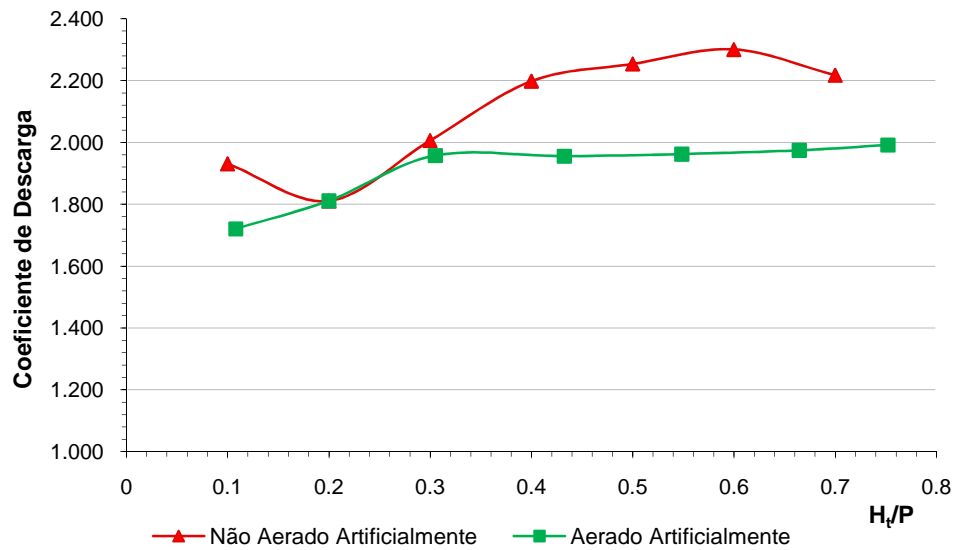


FIGURA 4.4 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DO COEFICIENTE DE DESCARGA OBSERVADAS NOS TESTES REALIZADOS NO PERFIL PLANO.

A Figura 4.5 mostra a condição de escoamento pressurizado observado no teste 1 ($H_i/P = 0,10$). A figura 4.6 compara o escoamento não aerado e aerado (através do tubo de aeração).



FIGURA 4.5 – PERFIL PLANO – $Q=2,13$ L/S ($H_i=2,00$ cm) – CONDIÇÃO PRESSURIZADA.

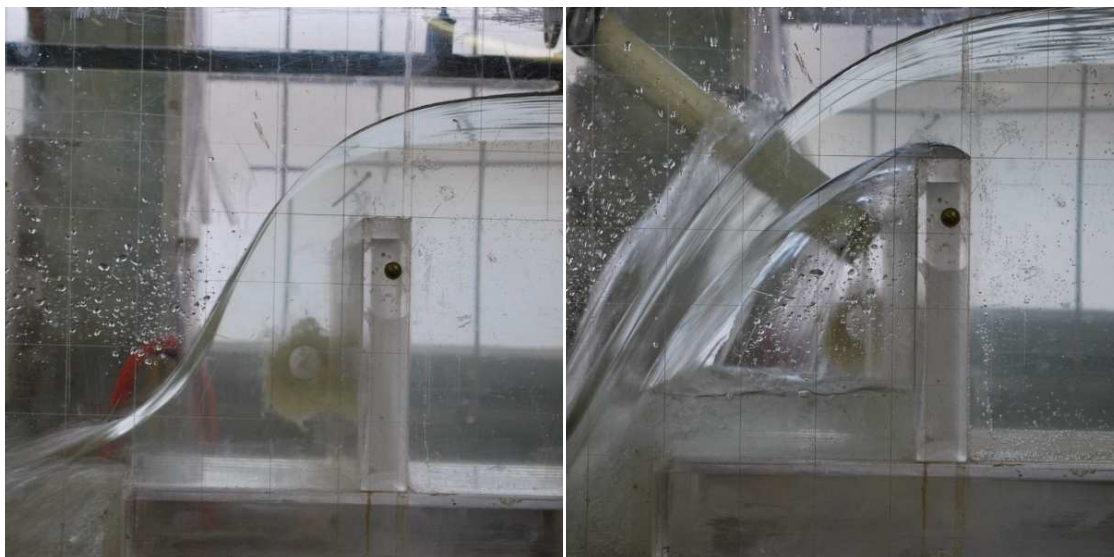


FIGURA 4.6 – PERFIL PLANO: $Q=27,80$ L/S ($H_t=10,00$ cm) – CONDIÇÃO NÃO AERADA / $Q=27,80$ L/S ($H_t=10,97$ cm) – CONDIÇÃO AERADA COM TUBO PARA VENTILAÇÃO.

Os resultados obtidos nos testes estão em concordância com os estudos presentes na bibliografia, que afirmam que a condição não aerada da lâmina vertente aumenta significativamente o coeficiente de descarga. Com exceção do teste 2 (carga igual a 4 cm), os ensaios com dispositivo para aeração alteraram o nível a montante da crista, o que reduziu a capacidade de descarga. Para H_t igual a 4 cm, o uso deste dispositivo não alterou o nível de montante, já que o escoamento verificado encontrava-se na condição totalmente aerada.

4.1.2 Crista Retilínea – Perfil Chanfrado

Assim como o perfil plano, o perfil chanfrado apresenta maior facilidade na construção, principalmente se comparado com o perfil WES ou quarto de circunferência. Este perfil é característico dos vertedouros de parede delgada, utilizados principalmente em laboratórios, como medidores de vazão.

Da mesma maneira que no perfil plano, os testes foram realizados para verificar o coeficiente de descarga no escoamento aerado e não aerado. A tabela 4.4 mostra os resultados obtidos nos testes realizados com e sem o tubo para aeração forçada. A figura 4.7 compara as curvas do coeficiente de descarga resultantes.

TABELA 4.4 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO PERFIL CHANFRADO.

Teste	Q (l/s)	Sem tubo para aeração			Com tubo para aeração		
		H_t (cm)	H_t / P	C	H_t (cm)	H_t / P	C
1	2,24	2,00	0,10	2,031	2,10	0,105	1,887
2	7,05	4,00	0,20	2,260	4,42	0,221	1,945
3	13,70	6,00	0,30	2,390	6,84	0,342	1,964
4	21,70	8,00	0,40	2,459	9,45	0,473	1,915
5	26,60	10,00	0,50	2,157	10,77	0,539	1,930
6	35,05	12,00	0,60	2,162	12,83	0,642	1,956
7	44,45	14,00	0,70	2,176	14,96	0,748	1,970

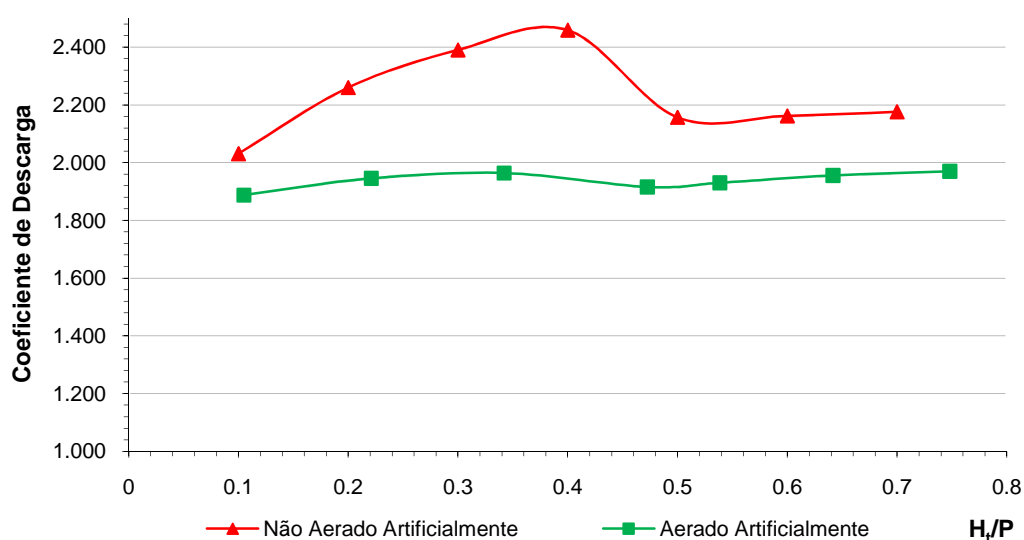


FIGURA 4.7 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DO COEFICIENTE DE DESCARGA OBSERVADAS NOS TESTES REALIZADOS NO PERFIL CHANFRADO.

Diferente do perfil plano, o perfil chanfrado apresenta pressões subatmosféricas mesmo com cargas muito baixas. A carga mínima utilizada nos testes foi de 2 cm, que representa H_t/P igual a 0,1. A figura 4.8 ilustra o desenvolvimento de pressão negativa na parte superior da crista, que gerou um aumento na capacidade de descarga da estrutura, e mostra a lâmina de água descolando da parte superior da crista após a colocação do tubo para aeração.



FIGURA 4.8 – DETALHE DO DESENVOLVIMENTO DE PRESSÃO NEGATIVA NA PARTE SUPERIOR DA CRISTA COM PERFIL CHANFRADO / APÓS A COLOCAÇÃO DE UM TUBO PARA AERAÇÃO ($H_t/P = 0,1$).

Em todos os testes realizados o escoamento formou uma lâmina não aerada com pressão negativa. Entretanto, observa-se uma redução no coeficiente de descarga para $H_t/P > 0,4$. Esse comportamento pode ser atribuído a separação do escoamento, que torna-se significativa para cargas maiores que 8 cm.

Como apresentado na figura 4.7, foi observada a redução no coeficiente de descarga da estrutura com escoamento totalmente aerado. A descontinuidade apresentada nas curvas do coeficiente de descarga, gerada pela separação do escoamento (a partir de $H_t/P > 0,4$), também foi verificada mesmo após a colocação do tubo para aeração.

A figura 4.9 mostra o comportamento do escoamento aerado e não aerado, para $H_t/P = 0,5$.



FIGURA 4.9 – PERFIL CHANFRADO: $Q=26,60$ L/S ($H_t=10,00$ cm) – CONDIÇÃO NÃO AERADA / $Q=26,60$ L/S ($H_t=10,77$ cm) – CONDIÇÃO AERADA COM TUBO PARA AERAÇÃO.

4.1.3 Crista Retilínea – Perfil WES Adaptado

O presente estudo também avaliou o comportamento o perfil WES, adaptado por MAGALHÃES (1983). Citado em diversos trabalhos, esse perfil de crista foi utilizado no projeto do vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva.

Diferente dos outros perfis, o padrão WES apresenta maior complexidade para construção. A espessura da parede e todas as dimensões da crista foram determinadas a partir do projeto do caso piloto, não seguindo o critério de TULLIS *et al.* (1995).

A tabela 4.5 mostra os resultados obtidos nos testes realizados com e sem o tubo para aeração forçada. A figura 4.10 compara as curvas do coeficiente de descarga resultantes.

TABELA 4.5 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO PERFIL WES ADAPTADO.

Teste	Q (l/s)	Sem tubo para aeração			Com tubo para aeração		
		H_t (cm)	H_t / P	C	H_t (cm)	H_t / P	C
1	2,13	2,00	0,10	1,931	2,00	0,100	1,931
2	6,40	4,00	0,20	2,051	4,00	0,200	2,051
3	12,20	6,00	0,30	2,128	6,00	0,300	2,128
4	20,45	8,00	0,40	2,317	8,23	0,412	2,221
5	28,80	10,00	0,50	2,335	10,25	0,513	2,250
6	39,30	12,00	0,60	2,424	12,48	0,624	2,286
7	48,95	14,00	0,70	2,396	14,45	0,723	2,285

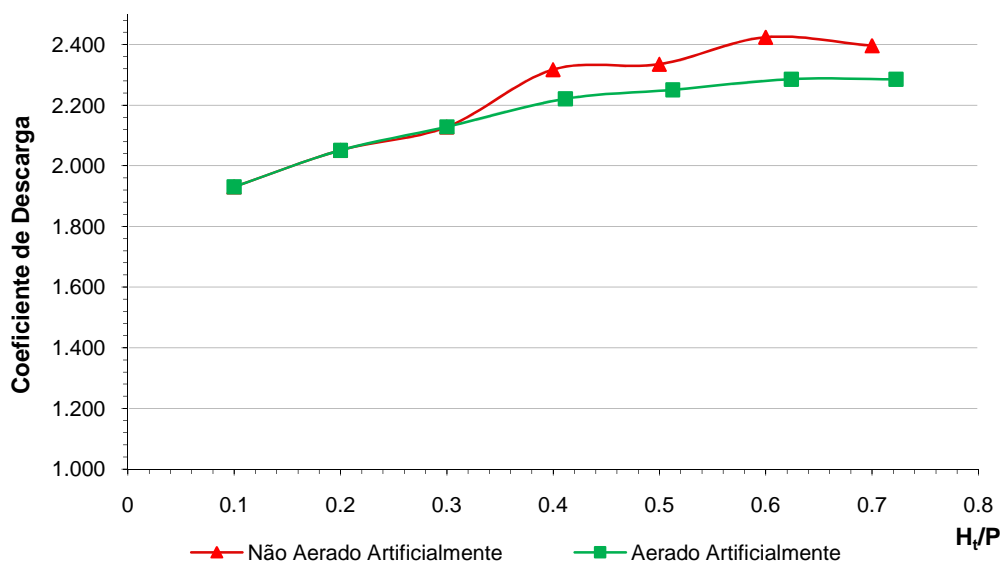


FIGURA 4.10 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DO COEFICIENTE DE DESCARGA OBSERVADAS NOS TESTES REALIZADOS NO PERFIL WES ADAPTADO.

Em relação à eficiência de aeração, o perfil WES se comportou de maneira semelhante ao perfil plano. Para $H_t/P \leq 0,3$, a lâmina vertente condicionou-se como aerada, sem auxílio do tubo para aeração. Com o aumento da carga e consequentemente da vazão, a lâmina de água colou na parede da crista e a pressão tornou-se subatmosférica. Atinge-se então a fase suprimida, na qual a espessura da lâmina vertente e o nível de água a jusante não permitem que o ar seja extraído na parte inferior da lâmina (LUX e HINCHLIFF, 1985).

Após a colocação do tubo para a aeração, os resultados obtidos mostraram a redução do coeficiente de descarga, devido ao aumento do nível a montante da estrutura, para as vazões observadas nos testes anteriores.

Verifica-se que, se comparado aos outros perfis, a variação da curva do coeficiente de descarga no escoamento não aerado para aerado foi pequena. O desempenho da estrutura não foi fortemente afetado pelo instrumento de aeração.

A figura 4.11 mostra o comportamento do escoamento aerado e não aerado, para $H_t/P = 0,4$.



FIGURA 4.11 – PERFIL WES: $Q=20,45$ L/S ($H=8,00$ cm) – CONDIÇÃO NÃO AERADA / $Q=20,45$ L/S ($H=8,23$ cm) – CONDIÇÃO AERADA COM TUBO PARA AERAÇÃO.

4.1.4 Crista Retilínea – Perfil Quarto de Circunferência

Segundo AMANIAN (1987), *apud* TULLIS *et al.* (1995), o mais prático e eficiente perfil de crista utilizado em vertedouros labirinto é o quarto de circunferência. Por estabelecer uma capacidade de descarga superior, se comparado aos outros perfis de fácil construção, o perfil quarto de circunferência é comumente utilizado nessa estrutura. Adicionalmente, os principais métodos de dimensionamento de vertedouros labirinto foram baseados e são válidos apenas para estruturas com esse perfil.

A tabela 4.6 mostra os resultados obtidos nos testes realizados com e sem o tubo para aeração forçada. A figura 4.12 compara as curvas do coeficiente de descarga resultantes.

TABELA 4.6 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO PERFIL QUARTO DE CIRCUNFERÊNCIA.

Teste	Q (l/s)	Sem tubo para aeração			Com tubo para aeração		
		H_t (cm)	H_t / P	C	H_t (cm)	H_t / P	C
1	2,13	2,00	0,10	1,931	2,00	0,100	1,931
2	6,45	4,00	0,20	2,067	4,00	0,200	2,067
3	12,45	6,00	0,30	2,172	6,00	0,300	2,172
4	20,75	8,00	0,40	2,351	8,23	0,412	2,253
5	29,45	10,00	0,50	2,388	10,35	0,518	2,268
6	39,44	12,00	0,60	2,433	12,46	0,623	2,299
7	49,08	14,00	0,70	2,434	14,42	0,721	2,298

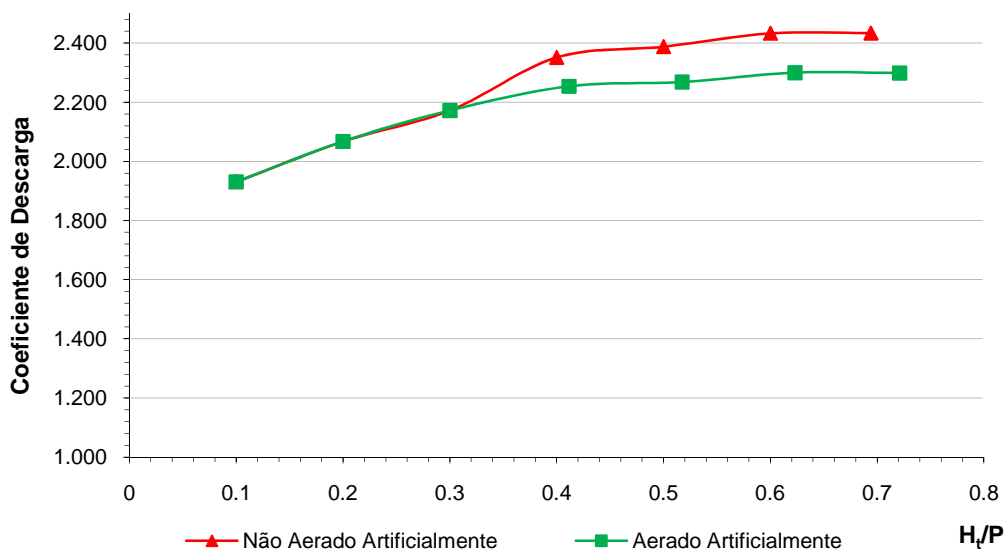


FIGURA 4.12 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DO COEFICIENTE DE DESCARGA OBSERVADAS NOS TESTES REALIZADOS NO PERFIL QUARTO DE CIRCUNFERÊNCIA.

De mesma forma que o perfil WES, o perfil quarto de circunferência manteve a lâmina vertente aerada para valores de $H_t \leq 6,00$ cm, sem o auxílio do tubo de ventilação. A partir dessa carga, o escoamento formou uma lâmina não aerada com pressão subatmosférica.

É possível observar o aumento do nível de água do reservatório nos testes em que foi utilizada a aeração forçada. A figura 4.12 ilustra essa redução do coeficiente de descarga. Se comparado ao perfil plano ou chanfrado, a diferença entre as duas curvas é significativamente menor. Em geral, o comportamento do perfil quarto de circunferência foi muito semelhante ao perfil WES.

A figura 4.13 mostra o comportamento do escoamento aerado e não aerado, para $H_t/P = 0,5$.



FIGURA 4.13 – PERFIL QUARTO DE CIRCUNFERÊNCIA – $Q=29,45$ L/S ($H=10,00$ cm) – CONDIÇÃO NÃO AERADA / $Q=29,45$ L/S ($H=10,35$ cm) – CONDIÇÃO AERADA COM TUBO PARA AERAÇÃO.

4.1.5 Estudo Comparativo – Crista Retilínea

4.1.5.1 Análise dos Resultados

Com resultados obtidos nos testes realizados, foram confrontados os comportamentos, em relação à capacidade de descarga e aeração, dos quatro perfis de crista analisados nesse estudo. A partir da figura 4.14, que compara as curvas do coeficiente de descarga observados nos quatro perfis, é possível observar a semelhança do comportamento do perfil chanfrado e do perfil plano, bem como a semelhança do perfil quarto de circunferência e WES. Verifica-se também que, quanto maior a vazão, maior a diferença entre o nível de montante observado.

O gráfico mostra que, para pequenas cargas, o coeficiente de descarga do perfil plano é muito inferior ao observado nos outros perfis, o que reduz significativamente a capacidade de descarga da estrutura. Para a relação $H_t/P > 0,3$, o perfil plano e o perfil chanfrado tendem a um comportamento semelhante.

Os perfis quarto de circunferência e WES apresentaram resultados muito parecidos, com diferenças relativamente pequenas no intervalo entre $0,2 \leq H_t/P \leq 0,5$, no qual o coeficiente de descarga observado no perfil quarto de circunferência foi maior. É possível observar também a significativa diferença entre o coeficiente de descarga desses dois perfis, se comparados aos perfis plano e chanfrado, que apresentaram resultados inferiores.

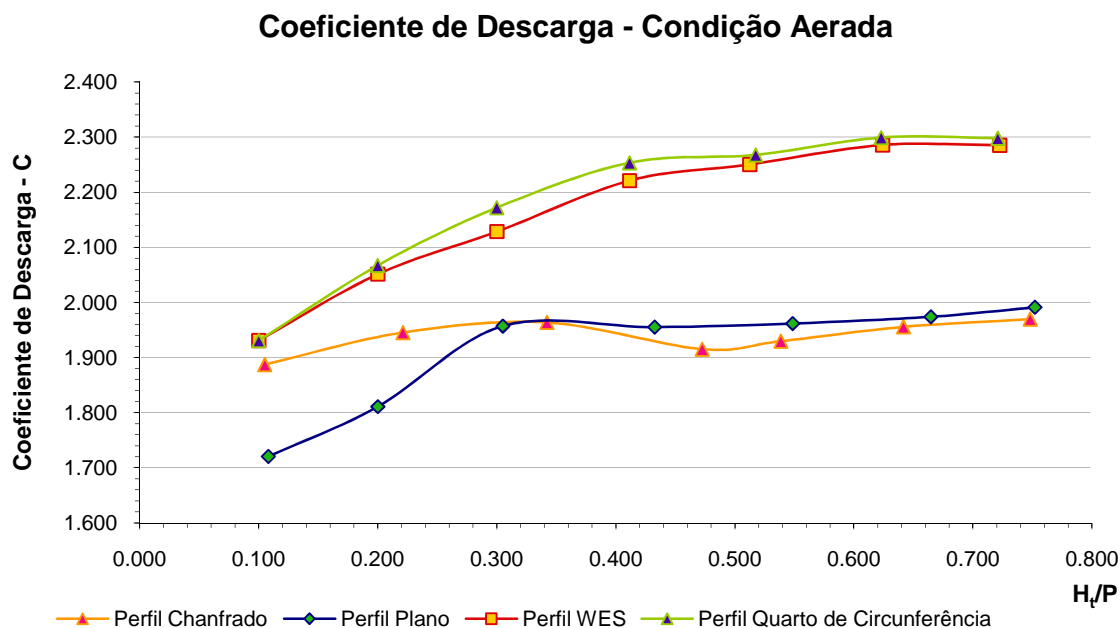


FIGURA 4.14 – COMPARAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DESCARGA OBSERVADOS EM CADA PERFIL, ANALISADO NA CONDIÇÃO AERADA.

Nos testes em que não foi utilizado o instrumento para aeração, foram observadas maiores diferenças entre o comportamento do perfil chanfrado e os demais. A figura 4.15 compara os coeficientes de descarga dos quatro perfis, na condição não aerada.

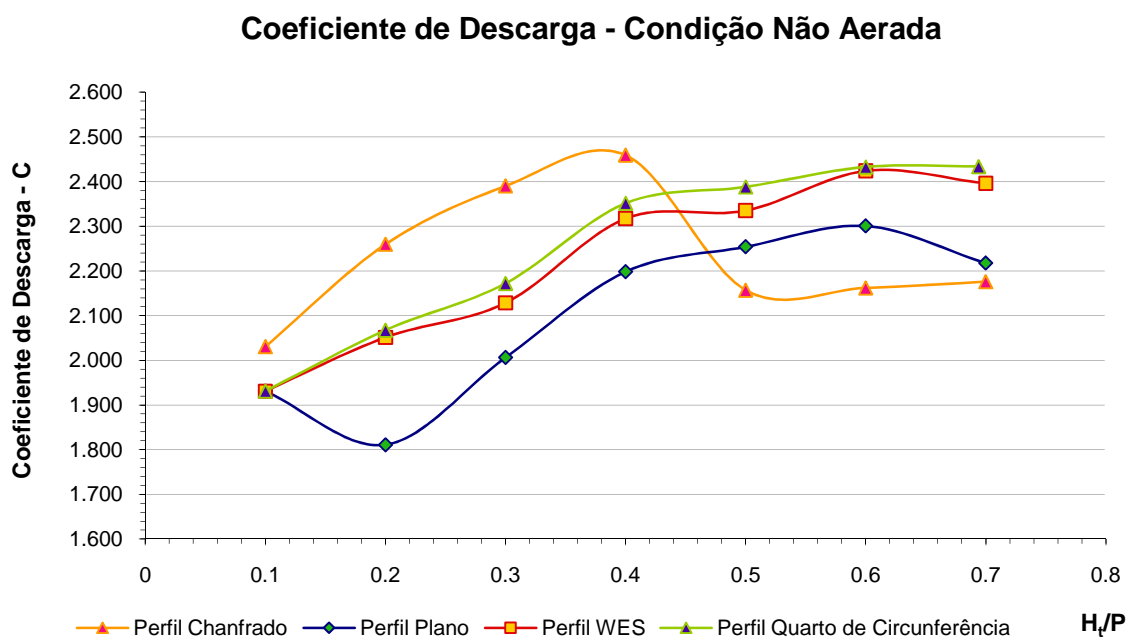


FIGURA 4.15 – COMPARAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DESCARGA OBSERVADOS EM CADA PERFIL, ANALISADO NA CONDIÇÃO NÃO AERADA.

É possível observar claramente que para $H_t/P \leq 0,4$, o perfil chanfrado apresentou elevados coeficientes de descarga. Como colocado no item 4.1.2., para cargas de até 8 cm não ocorreu a separação do escoamento, o que elevou a capacidade de descarga da estrutura. Para cargas maiores, assim como para todos os testes realizados nos outros três perfis na condição não aerada (sujeitos a pressão subatmosférica), foi observada essa separação no escoamento, que reduziu o coeficiente de descarga. O gráfico anterior evidencia a queda do coeficiente de descarga do perfil chanfrado para $H_t/P > 0,4$.

De maneira análoga à condição aerada, os resultados apresentados pelos perfis quarto de circunferência e WES foram muito semelhantes na condição não aerada. Já o comportamento do perfil plano foi significativamente diferente do perfil chanfrado. Para cargas maiores que 8 cm, o perfil plano foi mais eficiente, conferindo uma capacidade de descarga maior.

4.1.5.2 Considerações a Respeito do Perfil da Crista

Como esperado, o perfil plano apresentou coeficientes de descarga baixos, principalmente se comparado aos perfis WES e quarto de circunferência. Entretanto, para maiores cargas, a capacidade de descarga desse perfil foi maior que a do perfil chanfrado.

Os resultados verificados no perfil WES foram satisfatórios, e muito semelhantes aos obtidos nos testes realizados no perfil quarto de circunferência, que apresentou maior capacidade de descarga para todas as cargas analisadas.

Verificou-se que os perfis plano e chanfrado apresentam maiores diferenças entre as curvas de descarga na condição aerada e não aerada. A diferença de nível verificada no perfil WES e no perfil quarto de circunferência, após a colocação do instrumento de aeração, foi pequena, principalmente se comparada aos outros dois perfis. O estabelecimento da pressão atmosférica abaixo da lâmina vertente não causou elevadas reduções no coeficiente de descarga dessas estruturas.

Considerando as características avaliadas, capacidade de descarga e aeração, o perfil quarto de circunferência foi o mais eficiente. Ressalta-se também que, mesmo apresentando resultados semelhantes ao perfil WES, o perfil quarto de circunferência apresenta maior facilidade do ponto de vista construtivo.

4.2 Estudo Comparativo entre uma Soleira Retilínea e em Labirinto

Após os resultados obtidos nos estudos que definiram o perfil da crista mais adequado, foi realizada uma sequência de testes no canal do laboratório com o intuito de comparar o desempenho do vertedouro labirinto frente a uma soleira retilínea. A comparação envolveu a crista retilínea com perfil quarto de circunferência e a crista em labirinto com apenas um ciclo, conforme a figura 4.16.

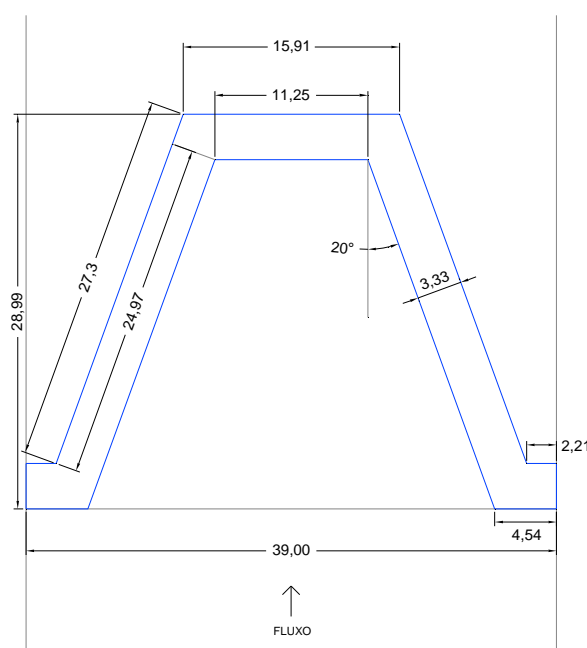


FIGURA 4.16 – LAYOUT DA CRISTA EM LABIRINTO COM UM CICLO ESTUDADA (PLANTA).

As características geométricas e os parâmetros de dimensionamento da estrutura analisada estão dispostos abaixo. O *layout* da estrutura seguiu os padrões do projeto do vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva (conforme apresentado no item 3.1). No presente estudo foi utilizado o perfil quarto de circunferência, enquanto o projeto original prevê a adoção do perfil WES adaptado.

Características Geométricas:

- Espessura da parede: $t = 3,33$ cm;
- Altura da crista: $P = 20,00$ cm;
- Ângulo formado na direção do escoamento: $\alpha = 20^\circ$;
- Ângulo formado na direção do escoamento - máximo: $\alpha_{m\acute{a}x} = 31,40^\circ$;

- Lado interno do vértice: $A = 11,25$ cm;
- Lado externo do vértice: $D = 15,91$ cm;
- Número de ciclos: $N = 1$;
- Comprimento do braço: $L_1 = 27,30$ cm;
- Comprimento efetivo do braço: $L_2 = 24,97$ cm;
- Comprimento total da crista em labirinto: $L = 74,93$ cm;
- Comprimento efetivo da crista em labirinto: $L_e = 65,61$ cm;
- Comprimento do vertedouro na direção do escoamento: $B = 28,99$ cm;
- Largura total da crista em labirinto: $W = 39,00$ cm;

Parâmetros de Dimensionamento:

- $w/P = 1,95$;
- $A/w = 0,288$;
- $L/W = 1,92$;
- $\alpha/\alpha_{m\acute{a}x} = 0,637$;

O método utilizado nesses ensaios foi essencialmente o mesmo aplicado nos testes realizados com crista retilínea. Dessa maneira, o estudo envolveu análises com e sem instrumentos para a aeração forçada da lâmina vertente. Os resultados obtidos nos testes realizados estão apresentados a seguir:

4.2.1 Crista em Labirinto – Perfil Quarto de Circunferência

De maneira análoga aos testes realizados com crista retilínea, o estudo envolveu análises com e sem instrumentos para a aeração forçada da lâmina vertente. Os resultados obtidos nos primeiros testes realizados na crista em labirinto com um ciclo e perfil quarto de circunferência, sem instrumentos para aeração, estão apresentados na tabela 4.7. Devido às limitações do medidor de vazão existente no canal do laboratório, não foi possível realizar testes para vazões maiores que 49,14 l/s, por não estarem dentro da faixa de calibragem.

TABELA 4.7 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NA CRISTA EM LABIRINTO COM UM CICLO E PERFIL QUARTO DE CIRCUNFERÊNCIA, SEM INSTRUMENTOS DE AERAÇÃO.

Teste	H_t (cm)	H_t / P	Q (l/s)	C	C_d
1	2,00	0,10	3,83	2,064	0,612
2	4,00	0,20	11,15	2,124	0,630
3	6,00	0,30	20,45	2,121	0,629
4	8,00	0,40	30,30	2,041	0,605
5	10,00	0,50	40,03	1,929	0,572
6	11,74	0,59	49,14	1,862	0,552

O coeficiente de descarga adimensional (C_d) foi determinado a partir da equação 4.2:

$$C_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{C}{\sqrt{2g}} \quad (4.2)$$

Nos testes realizados na crista em labirinto com um ciclo, foi observado que para cargas até 4,00 cm a lâmina vertente mantém-se aerada. Para carga de 5,00 cm a lâmina torna-se suprimida em vários pontos da crista, e com o contínuo aumento da carga (a partir de $H_t/P = 0,30$) verifica-se a pressão subatmosférica em toda a crista e a lâmina torna-se totalmente não aerada.

Com o intuito de obter resultados compatíveis com a maioria dos estudos sobre capacidade de descarga de vertedouros labirinto, foi utilizado um instrumento para aeração forçada da lâmina. Mantendo a mesma vazão encontrada na sequencia de testes anteriormente apresentada, foi observado o aumento da carga de montante da crista, e consequente diminuição do coeficiente de descarga. Os resultados estão apresentados na tabela 4.8.

TABELA 4.8 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NA CRISTA EM LABIRINTO COM UM CICLO E PERFIL QUARTO DE CIRCUNFERÊNCIA, COM INSTRUMENTOS DE AERAÇÃO.

Teste	H_t (cm)	H_t / P	Q (l/s)	C	C_d
1	2,00	0,10	3,83	2,064	0,612
2	4,00	0,20	11,15	2,124	0,630
3	6,10	0,31	20,45	2,069	0,613
4	8,36	0,42	30,30	1,911	0,567
5	10,35	0,52	40,03	1,832	0,543
6	12,19	0,61	49,14	1,760	0,522

O gráfico a seguir compara as curvas do coeficiente de descarga observados na estrutura com e sem instrumento para aeração (figura 4.17). Os resultados observados foram comparados com aqueles obtidos por TULLIS *et al.* (1995). As curvas propostas por esses autores foram interpoladas a fim de encontrar os resultados de coeficientes de descarga para estruturas com α igual a 20° . A figura 4.18 compara a curva interpolada de TULLIS *et al.* (1995) com a curva ajustada para os resultados experimentais obtidos nos testes realizados com instrumento para aeração.

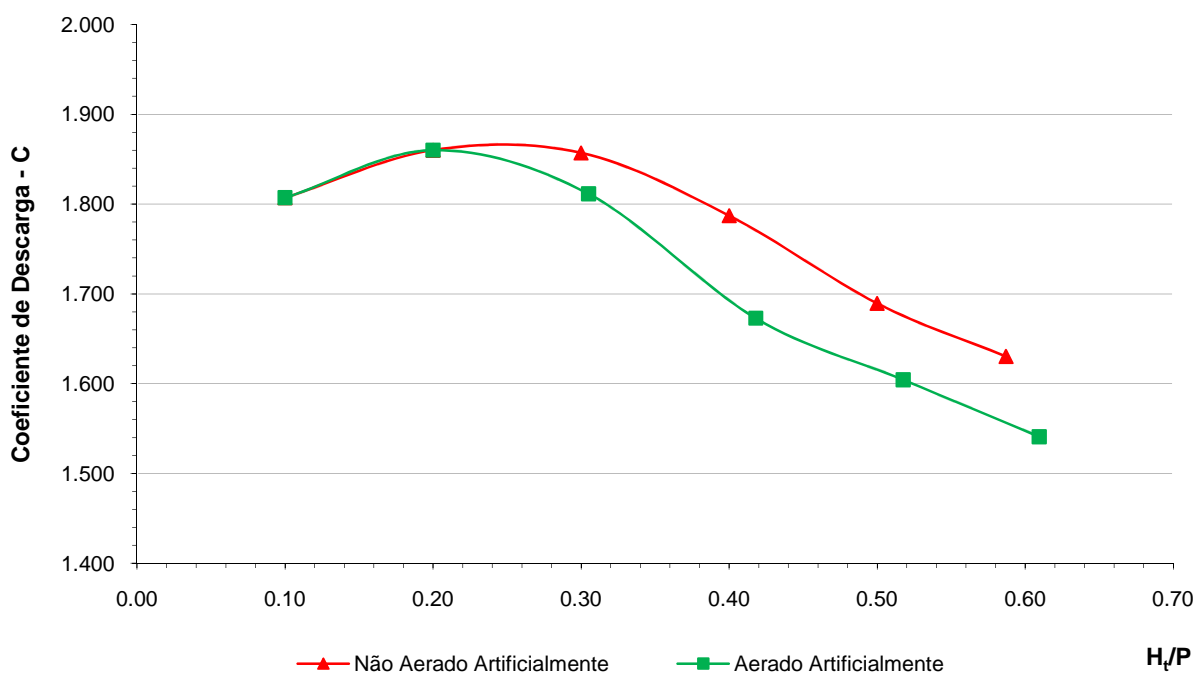


FIGURA 4.17 – COMPARAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DESCARGA OBSERVADOS NA CRISTA EM LABIRINTO COM UM CICLO E PERFIL QUARTO DE CIRCUNFERÊNCIA.

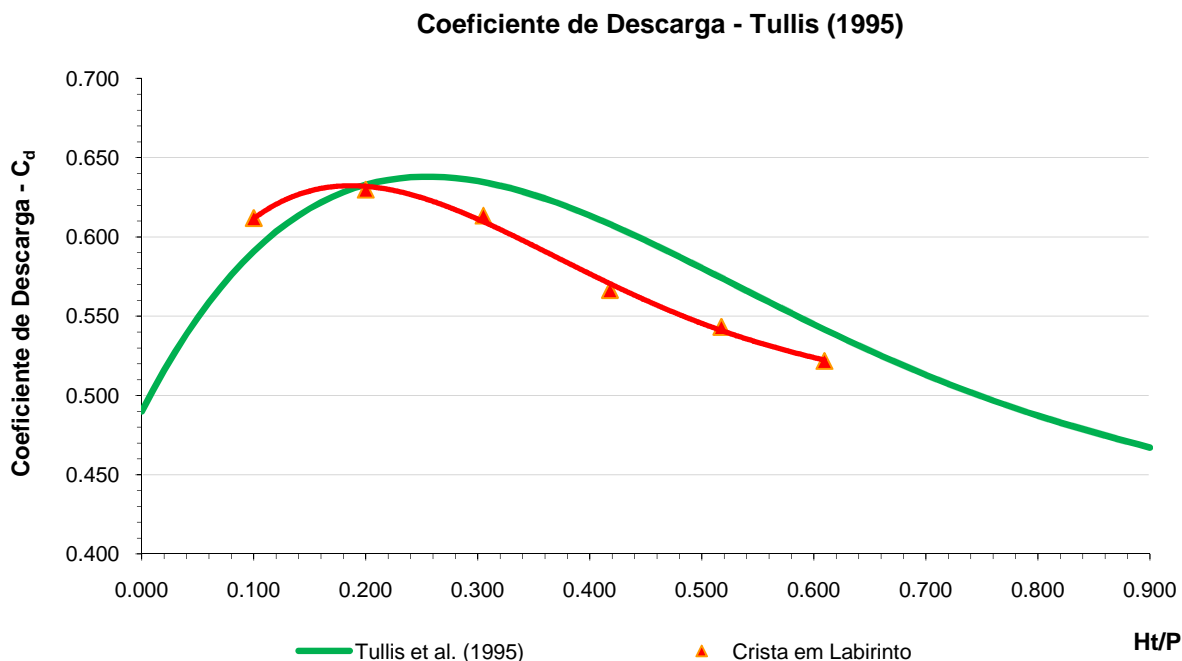


FIGURA 4.18 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS APRESENTADOS NO QUADRO 4.8, COM OS COEFICIENTES DE DESCARGA TEÓRICOS PARA ESTRUTURAS COM α IGUAL A 20°, INTERPOLADOS DAS CURVAS APRESENTADAS POR TULLIS *et al.* (1995).

Os resultados obtidos nos testes em laboratório mostraram valores do coeficiente de descarga abaixo do esperado. Essa diferença entre os coeficientes de descarga observados nesse estudo pode ser atribuída às condições em relação aos parâmetros de dimensionamento impostas por TULLIS *et al.* (1995) em seus estudos. Como foi apresentado no item 3.1, no projeto do vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva alguns desses parâmetros de dimensionamento estão em desacordo com as limitações propostas na bibliografia.

Adicionalmente, os estudos experimentais apresentados por TULLIS *et al.* (1995) foram realizados em vertedouros labirinto com perfil quarto de círculo apenas para as estruturas com o ângulo α de até 18°. Segundo os autores, as demais curvas, quando interpoladas, podem apresentar erros de até 10%.

A figura 4.19 mostra a configuração em planta da crista em labirinto com um ciclo utilizada nos testes realizados. As figuras 4.20 e 4.21 mostram o comportamento do escoamento aerado e não aerado, para $H_t/P = 0,4$.



FIGURA 4.19 – CONFIGURAÇÃO EM PLANTA DA CRISTA EM LABIRINTO PILOTO.

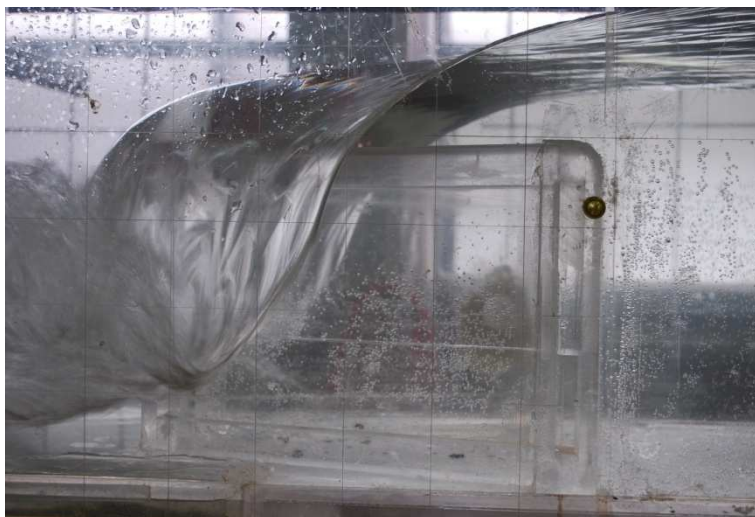


FIGURA 4.20 – ESTRUTURA EM LABIRINTO COM 1 CICLO – $Q=30,30$ L/S ($H=8,00$ CM) - CONDIÇÃO NÃO AERADA.



FIGURA 4.21 – ESTRUTURA EM LABIRINTO COM 1 CICLO – $Q=30,30$ L/S ($H=8,36$ CM) - CONDIÇÃO AERADA COM TUBO PARA AERAÇÃO.

4.2.2 Estudo comparativo – Crista Retilínea x Crista em Labirinto

Após as verificações realizadas foi verificado que, dos quatro tipos de perfis avaliados para crista retilínea, o perfil quarto de circunferência apresentou maior capacidade de descarga para um nível de montante pré-estabelecido. Utilizando este mesmo perfil, foi construída uma estrutura em labirinto com a mesma altura de crista a fim de avaliar o aumento da capacidade de descarga gerada por este tipo de vertedouro.

As figura 4.22 e 4.23 comparam as curvas de descarga e os coeficientes de descarga observados na crista retilínea e em labirinto com um ciclo, no escoamento na condição aerada.

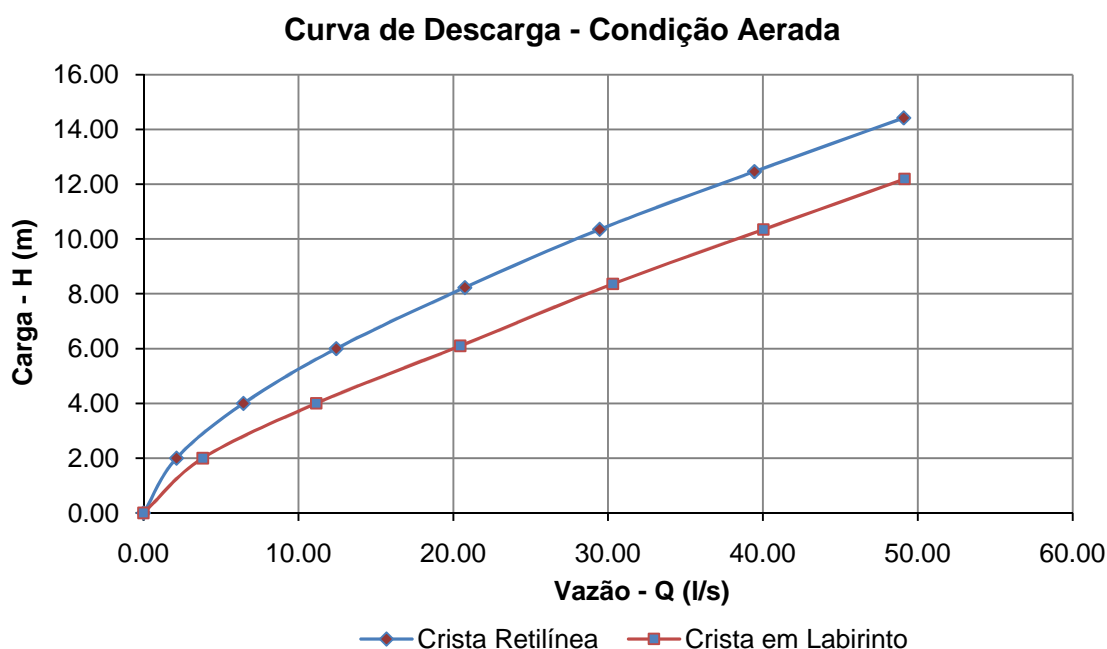


FIGURA 4.22 – COMPARAÇÃO DA CURVA DE DESCARGA VERIFICADA NOS VERTEDOUROS COM CRISTA RETILÍNEA E EM LABIRINTO COM UM CICLO.

Através da figura 4.22 é possível comparar o desempenho do vertedouro com a crista em labirinto e com a crista retilínea. Observa-se um aumento significativo da vazão, para um mesmo nível de reservatório. Em termos quantitativos, este aumento chega até 80% para pequenas cargas e vai diminuindo com o aumento da vazão, chegando aproximadamente 30% para $Ht/P = 0,6$.

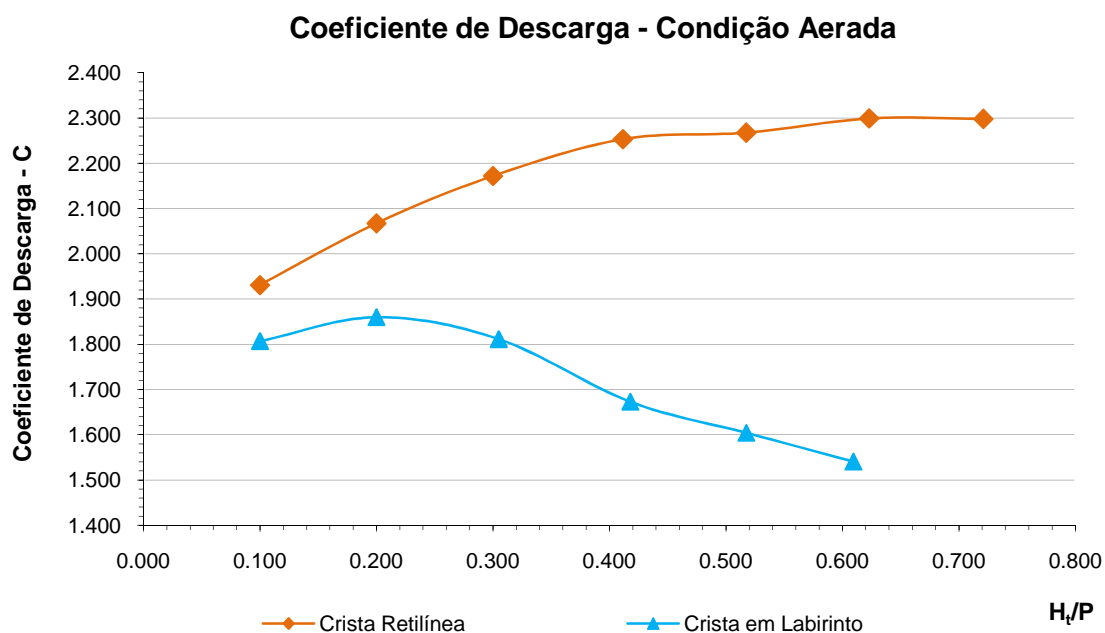


FIGURA 4.23 – COMPARAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DESCARGA VERIFICADA NOS VERTEDOUROS COM CRISTA RETILÍNEA E EM LABIRINTO COM UM CICLO.

Conforme apresentado no Capítulo II – Revisão Bibliográfica, muitos estudos afirmam que o aumento da capacidade da estrutura pode ser mensurado pela eficiência ε , calculada através da equação 2.24 proposta por FALVEY (2003). Aplicando esta equação aos testes realizados em laboratório verificamos os seguintes resultados (tabela 4.9).

TABELA 4.9 – EFICIÊNCIA DO VERTEDOURO LABIRINTO COM $N = 1$ CICLO, EM FUNÇÃO DE H_t/P .

Teste	Q (l/s)	H_t/P	$C_d(20^\circ)$	$C_d(90^\circ)$	L/W	ε	Q_L/Q_R
1	3,83	0,10	0,591	0,612	1,92	1,86	1,80
2	11,15	0,20	0,633	0,691	1,92	1,76	1,73
3	20,45	0,31	0,635	0,738	1,92	1,65	1,61
4	30,30	0,42	0,608	0,758	1,92	1,54	1,45
5	40,03	0,52	0,574	0,760	1,92	1,45	1,37
6	49,14	0,61	0,542	0,755	1,92	1,38	1,30

A tabela também compara a eficiência (ε) com a relação entre a vazão observada na crista em labirinto e na crista retilínea, para uma mesma carga. O valor experimental representado pela relação Q_L/Q_R mostrou ser menor que aquele teórico calculado segundo FALVEY (2003).

A figura 4.23 mostra o comportamento do coeficiente de descarga da estrutura em labirinto perante a estrutura retilínea. Como esperado, os resultados

obtidos mostraram que a estrutura em labirinto possui coeficientes de descargas menores, já que os vértices existentes na crista em zig-zag diminuem seu comprimento efetivo. Com o aumento da carga o escoamento começa a “ignorar” o labirinto, reduzindo cada vez mais o coeficiente de descarga. É possível observar claramente no gráfico que, com o aumento da carga sobre a crista ocorre uma redução da melhoria de desempenho verificada pelo uso vertedouro labirinto.

A comparação entre os resultados obtidos nos testes realizados com a crista retilínea e em labirinto comprovou, como esperado, que o uso de vertedouros labirinto gera um aumento considerável na capacidade de descarga da estrutura. Utilizando como caso piloto o vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva, foi realizado o estudo para avaliar alternativas de *layout* da crista do vertedouro, visando a otimização da capacidade de descarga e aeração, sem aumentos significativos dos custos que será apresentado a seguir.

5 CAPÍTULO V: ESTUDO EM MODELO REDUZIDO TRIDIMENSIONAL

5.1 Determinação das Alternativas de Layout da Crista em Labirinto

5.1.1 Método Desenvolvido para o Projeto de Vertedouros Labirinto

Com o intuito de determinar alternativas para a crista do vertedouro labirinto, fixando os valores de W (largura total do canal) e de L (comprimento total da crista em labirinto), desenvolveu-se um método, baseado nas equações propostas por TULLIS *et al.* (1995), que permite criar, através de um processo iterativo, diversas propostas de *layout* para diferentes números de ciclos N . Utilizam-se como dados de entrada dimensões que, do ponto de vista do projeto, são facilmente perceptíveis. Adicionalmente, mantendo a relação L/W constante em todas as alternativas, o custo com o concreto armado utilizado na estrutura em labirinto será sempre o mesmo, independente do número de ciclos.

Utilizando o software *Microsoft Excel*, a rotina de cálculo desenvolvida para o projeto do vertedouro labirinto foi criada através da linguagem de programação *Microsoft Visual Basic 6.3* da *Microsoft Corporation*.

O procedimento é iniciado através do comando “Iniciar”, que abra a tela para a informação dos dados de entrada do programa, conforme a figura 5.1.

FIGURA 5.1 – TELA PARA INFORMAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA.

Os primeiros dados a serem informados são a largura total do canal em que será inserido o vertedouro labirinto (W) e o comprimento total da crista em labirinto (L). Em seguida deve ser informada a altura da parede da crista (P). É necessário informar também o valor da carga de projeto (H_d).

Pede-se ainda para determinar um número de ciclos máximo que representará o número de alternativas de projeto que o programa irá calcular. Por exemplo, limitando o número de ciclos máximo como 10, o programa irá calcular todas as dimensões, parâmetros de dimensionamento e a vazão para dez alternativas, com N variando de 1 a 10.

Após a definição dos dados de entrada, o programa determina os valores da espessura da parede (t), como $1/6$ do valor da altura da parede (P) e do lado interno do vértice (A), estipulado como 1,5 vezes o valor de t . Estas dimensões são as fixas para todas as alternativas, independente do número de ciclos.

Com estes valores são calculados a largura de um ciclo (w) e o comprimento de um ciclo (l). Inicia-se, então, o processo iterativo que calcula os valores do lado externo do vértice (D) e o ângulo formado na direção do escoamento (α). Arbitrando um valor inicial para α igual a 0,0001, calcula-se o valor de D . A partir deste valor, determina-se o valor de w' , dado α arbitrado e D anteriormente calculado:

O valor de w' é comparado com o valor de w calculado inicialmente. Se a diferença absoluta entre os valores for maior que 0,00001, o processo inicia-se

novamente e o valor de α é incrementado em 0,0001. Este *looping* é realizado até que a diferença entre w' e w seja menor que 0,00001.

Alcançado o resultado desejado o programa continua e calcula as demais dimensões para o projeto de vertedouros labirinto.

São determinados ainda os principais parâmetros de dimensionamento presentes na bibliografia. Para o uso do ábaco proposto por TULLIS *et al.* (1995), que determina o coeficiente de descarga em função de α e H_t/P , é necessário que alguns parâmetros estejam dentro dos limites propostos.

Neste estudo foi utilizado o método proposto por TULLIS *et al.* (1995) para estimar a vazão teórica (Q), segundo a equação 5.1:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot L_e \cdot H_t^{1,5} \quad (5.1)$$

Conforme apresentado anteriormente, a equação considera um valor teórico de comprimento efetivo que leva em conta possíveis perdas de capacidade de descarga devido às interferências da lâmina vertente em virtude da geometria em planta da estrutura.

Nem sempre as alternativas calculadas ficam dentro das faixas de dimensionamento proposta. A escolha pela melhor alternativa também deve levar em conta as opções que se enquadrem nestes limites. O coeficiente de descarga é definido através da interpolação das curvas determinadas por TULLIS *et al.* (1995), e a vazão teórica, para dada carga de projeto.

Através do método desenvolvido foi possível determinar alternativas de *layout* da crista para o vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva. A tabela 5.1 apresentada no item a seguir exemplifica os dados de saída obtidos pela rotina de cálculo criada.

5.1.2 Alternativas Avaliadas

O vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva, utilizado nesse estudo como caso piloto, está inserido em um canal com largura total igual a 91,20 metros, e seu comprimento total é de 175,20 metros. A relação entre o comprimento (L) e a largura (W) é igual a 1,92.

Utilizando o método de dimensionamento descrito no item anterior, com a relação L/W fixada em 1,92, foram calculadas as dimensões da crista para diferentes

números de ciclos (N). O valor da altura da crista (P) foi mantido constante em todas as alternativas, igual a 4 metros (dado do projeto do vertedouro labirinto avaliado), e a espessura da parede (t) foi fixada em todas as propostas como 1/6 do valor total de P , igual a 0,67 metros. O lado interno do vértice (A) é igual a 1,00 metro, ou seja 1,5 vezes o valor de t . Partindo dessas imposições, foram determinados 12 *layouts*, variando N de 1 a 12 (tabela 5.1).

A carga de projeto do vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva é igual a 2,0 m, que representa o valor da relação $H_t/P = 0,5$. Partindo dessa relação, e ainda considerando o ângulo α de cada uma das estruturas, o programa determina o coeficiente de descarga C_d através da interpolação das curvas apresentadas pelos autores.

A partir dos dados obtidos foram selecionados 4 *layouts* para serem analisados em modelo reduzido. Os *layouts* foram escolhidos considerando as configurações geométricas condizentes com dimensões usuais de projeto. Seguindo um padrão de proporcionalidade para facilitar a comparação de resultados, foram escolhidas as estruturas com N igual a 3, 6, 9 e 12 ciclos, conforme a figura 5.2.

TABELA 5.1 – PROPOSTAS DE PROJETO CALCULADAS PELO MÉTODO DESENVOLVIDO.

Dimensões									Parâmetros de Dimensionamento					Capacidade de descarga	
N	w (m)	I (m)	D (m)	α (°)	L ₁ (m)	L ₂ (m)	B (m)	L _e (m)	L/W	w/P	A/w	$\alpha/\alpha_{\text{máx}}$	ϵ	C _d	Q (m³/s)
1	91,20	175,20	1,76	30,87	86,22	85,84	74,68	173,69	1,92	22,80	0,01	0,98	1,72	0,68	988,93
2	45,60	87,60	1,76	30,33	42,42	42,04	37,28	172,14	1,92	11,40	0,02	0,97	1,72	0,68	975,58
3	30,40	58,40	1,77	29,79	27,81	27,43	24,81	170,56	1,92	7,60	0,03	0,95	1,71	0,67	962,02
4	22,80	43,80	1,78	29,22	20,51	20,12	18,57	168,94	1,92	5,70	0,04	0,93	1,70	0,67	948,14
5	18,24	35,04	1,79	28,63	16,12	15,73	14,82	167,29	1,92	4,56	0,06	0,91	1,69	0,66	933,95
6	15,20	29,20	1,80	28,02	13,20	12,80	12,32	165,59	1,92	3,80	0,07	0,89	1,68	0,66	919,49
7	13,03	25,03	1,81	27,39	11,11	10,70	10,53	163,84	1,92	3,26	0,08	0,87	1,67	0,66	904,64
8	11,40	21,90	1,82	26,73	9,54	9,13	9,19	162,06	1,92	2,85	0,09	0,85	1,66	0,66	889,46
9	10,13	19,47	1,83	26,04	8,32	7,90	8,14	160,21	1,92	2,53	0,10	0,83	1,65	0,65	873,89
10	9,12	17,52	1,84	25,32	7,34	6,92	7,30	158,32	1,92	2,28	0,11	0,81	1,64	0,65	857,91
11	8,29	15,93	1,86	24,57	6,54	6,11	6,61	156,36	1,92	2,07	0,12	0,78	1,62	0,64	837,38
12	7,60	14,60	1,87	23,79	5,87	5,43	6,03	154,33	1,92	1,90	0,13	0,76	1,69	0,63	813,08

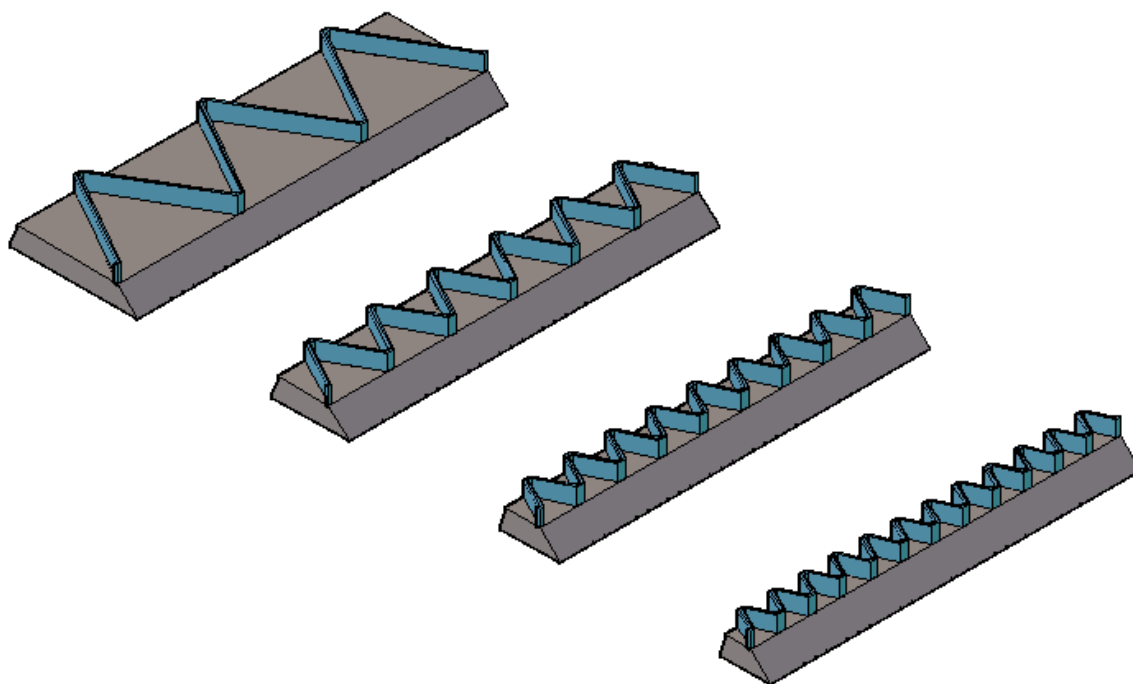


FIGURA 5.2 – REPRESENTAÇÃO DAS QUATRO PROPOSTAS DE *LAYOUT* CONSTRUÍDAS EM MODELO REDUZIDO.

5.1.3 Construção das alternativas propostas em modelo reduzido

Definidos os quatro *layouts* e o perfil da crista, foram construídas as estruturas em modelo reduzido. O estudo foi desenvolvido no modelo reduzido construído na escala geométrica 1:40 e operado segundo o critério de semelhança de Froude, reproduzindo uma área suficiente para simular de maneira adequada os escoamentos de aproximação e de descargas de protótipo.

No caso de escoamento com superfície livre, a força preponderante sobre as demais forças atuantes, ou possíveis de atuar, é a força gravitacional. Resulta dessa consideração, para os estudos conduzidos no modelo, o critério de semelhança de Froude, expresso pela equação:

$$Fr_m = Fr_p \quad \text{ou,} \quad (5.2)$$

$$\frac{v_m}{\sqrt{g_m \cdot l_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{g_p \cdot l_p}}$$

Sendo:

v = velocidade do escoamento (m/s);

l = dimensão linear, no caso a profundidade (m) ;

- g = aceleração da gravidade (m/s²);
 m = índice que se refere aos valores de modelo;
 p = índice que se refere aos valores de protótipo.

Considerando que a escala do modelo (λ) é expressa pela relação $\lambda = l_m / l_p$ e que a aceleração da gravidade seja a mesma no modelo e no protótipo ($\lambda_g = g_m / g_p = 1$), resulta da equação 5.2, a escala de velocidades:

$$\lambda_v = \frac{v_m}{v_p} = \frac{(g \cdot l_m)^2}{(g \cdot l_p)^2} = \left(\frac{l_m}{l_p} \right)^{1/2} = \lambda^{1/2} \quad (5.3)$$

Considerando ainda que o fluido no modelo e no protótipo é o mesmo (água), ou seja $\lambda_\gamma = 1$ (aonde γ representa o peso específico), determina-se as escalas das vazões e velocidades aplicadas ao modelo:

- Escala das velocidades:

$$\lambda_v = \left(\frac{1}{40} \right)^{1/2} = \frac{1}{6,32}$$

- Escala das vazões:

$$\lambda_Q = \frac{v_m}{v_p} \cdot \frac{l_m}{l_p} = \lambda^{1/2} \cdot \lambda = \lambda^{5/2} \quad (5.4)$$

$$\lambda_Q = \left(\frac{1}{40} \right)^{5/2} = \frac{1}{10119}$$

O modelo do vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva, bem como as outras quatro alternativas de *layout* foram construídos em acrílico, reproduzindo todas as partes em contato com a água. A crista em labirinto foi apoiada sobre uma base trapezoidal, conforme o projeto original do caso piloto. A figura 5.3 representa a vista lateral da crista.

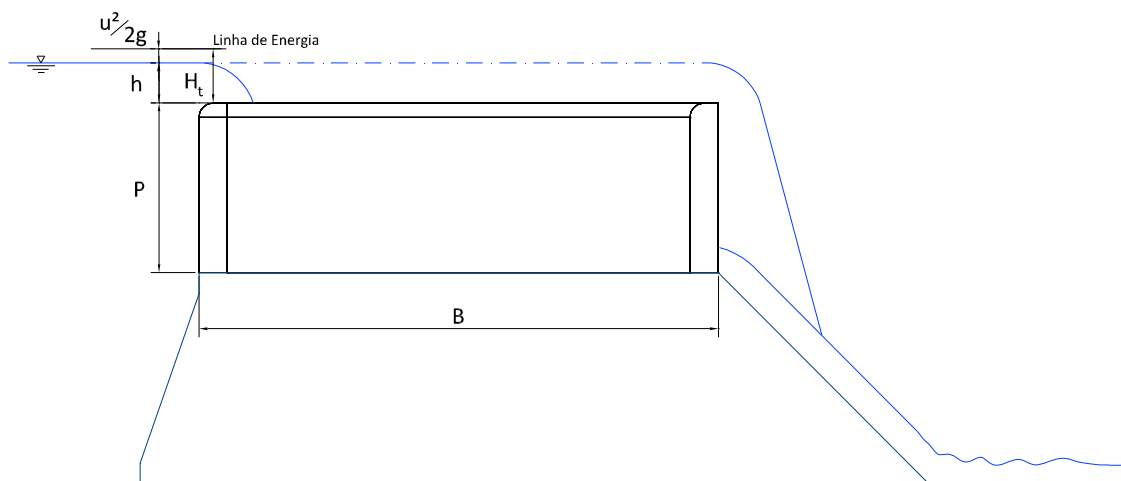


FIGURA 5.3 – REPRESENTAÇÃO DO PERFIL DA CRISTA EM LABIRINTO, SUAS DIMENSÕES E GRANDEZAS DO ESCOAMENTO.

A reprodução do relevo da região da barragem foi baseada nos desenhos fornecidos pela empresa projetista da PCH Bocaiúva. O modelo foi construído sobre um piso de concreto, no qual foram demarcados o sistema de coordenadas, os limites do modelo e as referências de nível. O piso do laboratório foi convencionado como plano da cota correspondente à elevação 281,00 m no protótipo. Foram implantadas sobre o piso seções transversais do relevo espaçadas em 20,00 m (dimensões de protótipo), desenhadas e recortadas em chapas de Duratex e niveladas no local. Os espaços entre as seções foram preenchidos com pedra britada e o acabamento da superfície foi executado com argamassa de cimento. Com o intuito de garantir a impermeabilização do modelo, o acabamento foi realizado com nata de cimento. Após a conclusão dessa fase, o leito do rio e as escavações foram cobertos com uma rugosidade feita de pedregulhos.

Além da área ocupada pelo modelo, foram utilizadas áreas destinadas à alimentação e à restituição do fluxo, e à operação do modelo. A água necessária para a realização dos ensaios é armazenada em um reservatório elevado de nível constante para estabelecer o escoamento permanente. Deste, a água é conduzida para o modelo por gravidade através de tubulações que alimentam um conjunto de medidores de vazão que permitem simular no modelo as vazões compreendidas entre 111,75 m³/s e 1088,00 m³/s no protótipo. O vertedouro retangular foi utilizado para a imposição das menores vazões, e o medidor venturi foi utilizado para as maiores vazões.

A determinação da curva de descarga de cada estrutura foi realizada através da imposição de uma série de vazões pré-estabelecidas e das correspondentes leituras do nível do reservatório para a obtenção da carga. Com base nos estudos hidrológicos obtidos no caso piloto, 13 vazões foram impostas nos ensaios realizados. O nível de água no modelo foi obtido através da leitura da régua linimétrica (PL) implantada na posição indicada na figura 5.4.

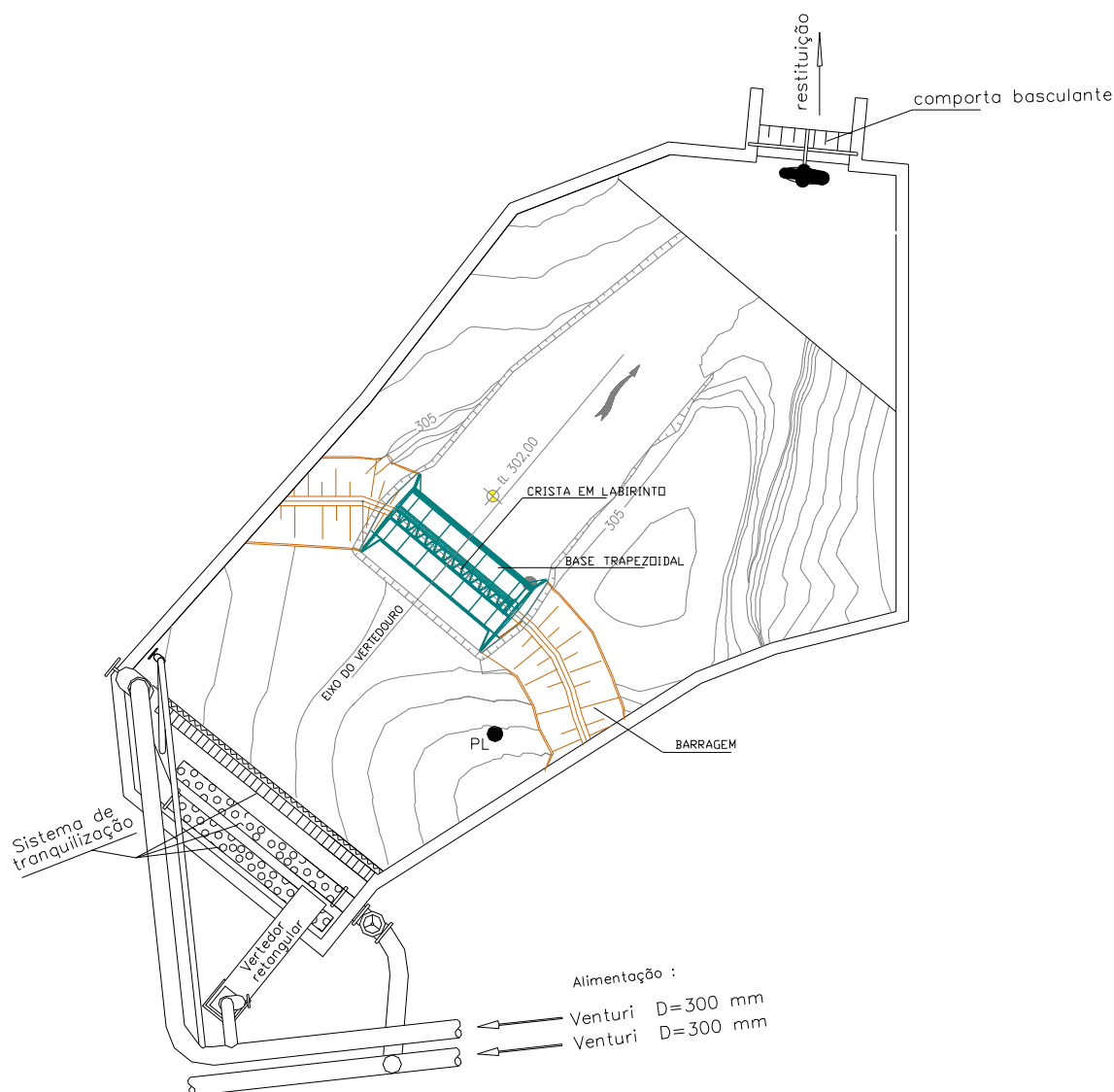


FIGURA 5.4 – CONFIGURAÇÃO GERAL DO MODELO REDUZIDO.

A partir da leitura do nível do reservatório foi possível calcular a carga sobre a crista para cada uma das vazões avaliadas, e com isso determinar os valores dos coeficientes de descarga, em função da relação H/P , para cada uma das estruturas.

A análise visual das condições do escoamento foi realizada com o auxílio de corante e confetes. A configuração estabelecida nos testes bem como os resultados obtidos serão apresentados no item 5.2.

As figuras 5.5 a 5.8 mostram as peças construídas em acrílico, que representam as cristas em labirinto, apoiadas sobre uma base de madeira. Inseridas no canal do modelo reduzido do vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva, as quatro alternativas propostas foram precisamente niveladas tendo como referência a cota da crista do caso piloto.

A figura 5.9 mostra o modelo reduzido do vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva. É possível notar que o vertedouro projetado possui uma estrutura de dissipação de energia composta por degraus, seguida por uma laje de concreto. As alternativas de *layout* propostas não possuem esta estrutura de dissipação. Considerando que o trabalho não visa avaliar possíveis problemas de erosão a jusante do vertedouro, as peças foram confeccionadas apenas sobre uma base de madeira com perfil de montante igual ao caso piloto, e com perfil de jusante inclinado a 45°, sem a composição degrau-laje de concreto.



FIGURA 5.5 – MODELO REDUZIDO DA ALTERNATIVA COM N = 3 CICLOS.

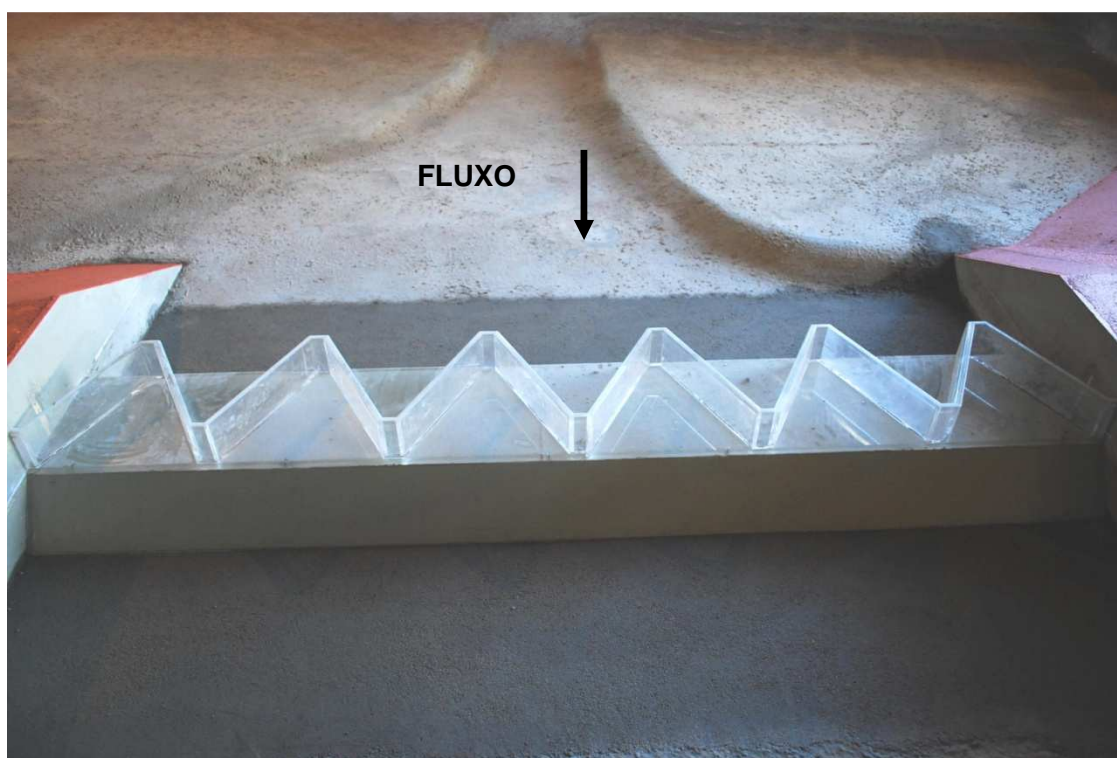


FIGURA 5.6 – MODELO REDUZIDO DA ALTERNATIVA COM $N = 6$ CICLOS.

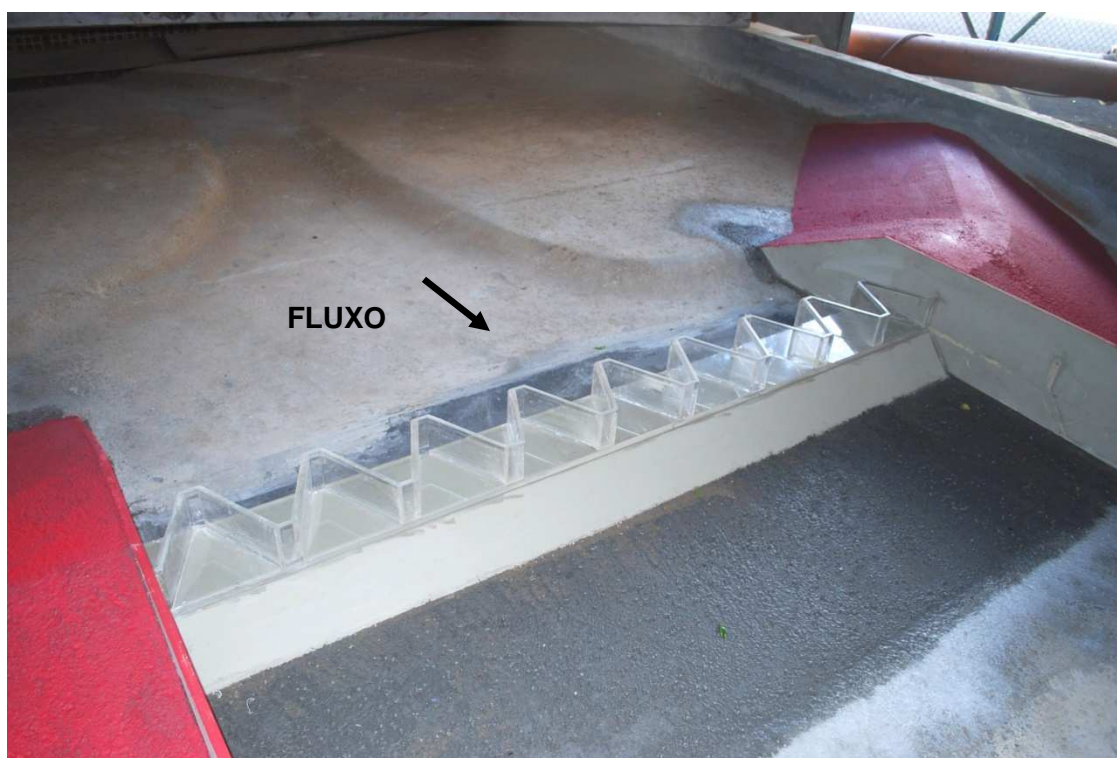


FIGURA 5.7 – MODELO REDUZIDO DA ALTERNATIVA COM $N = 9$ CICLOS.

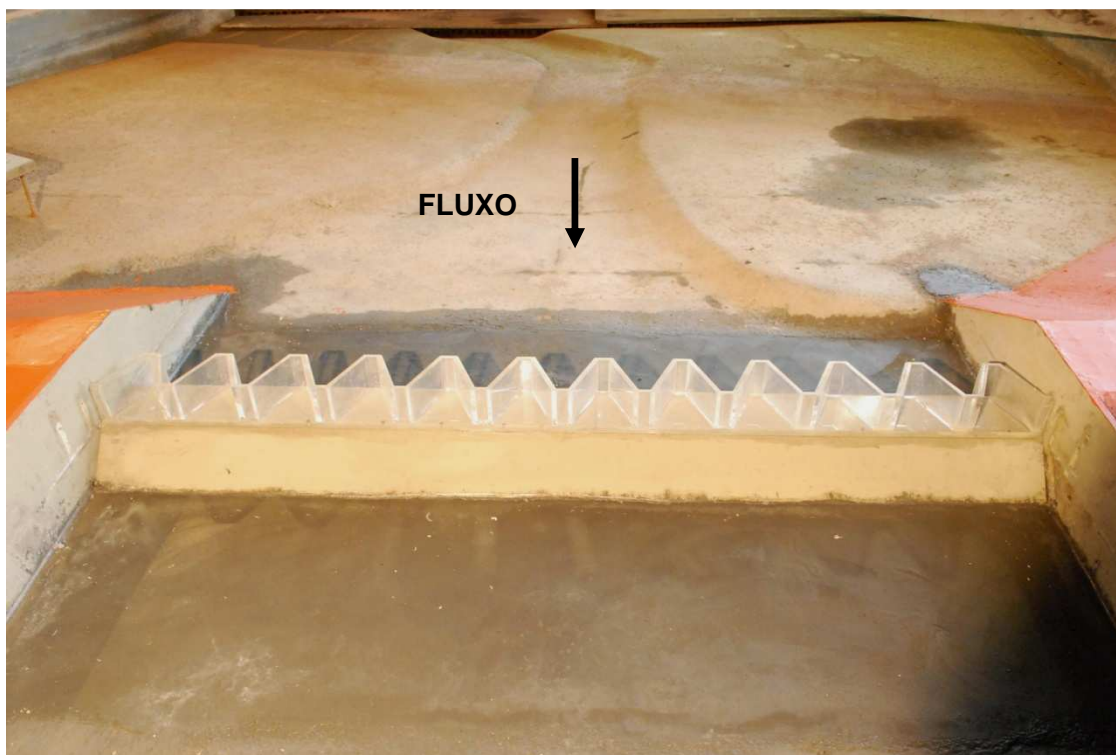


FIGURA 5.8 – MODELO REDUZIDO DA ALTERNATIVA COM N = 12 CICLOS.

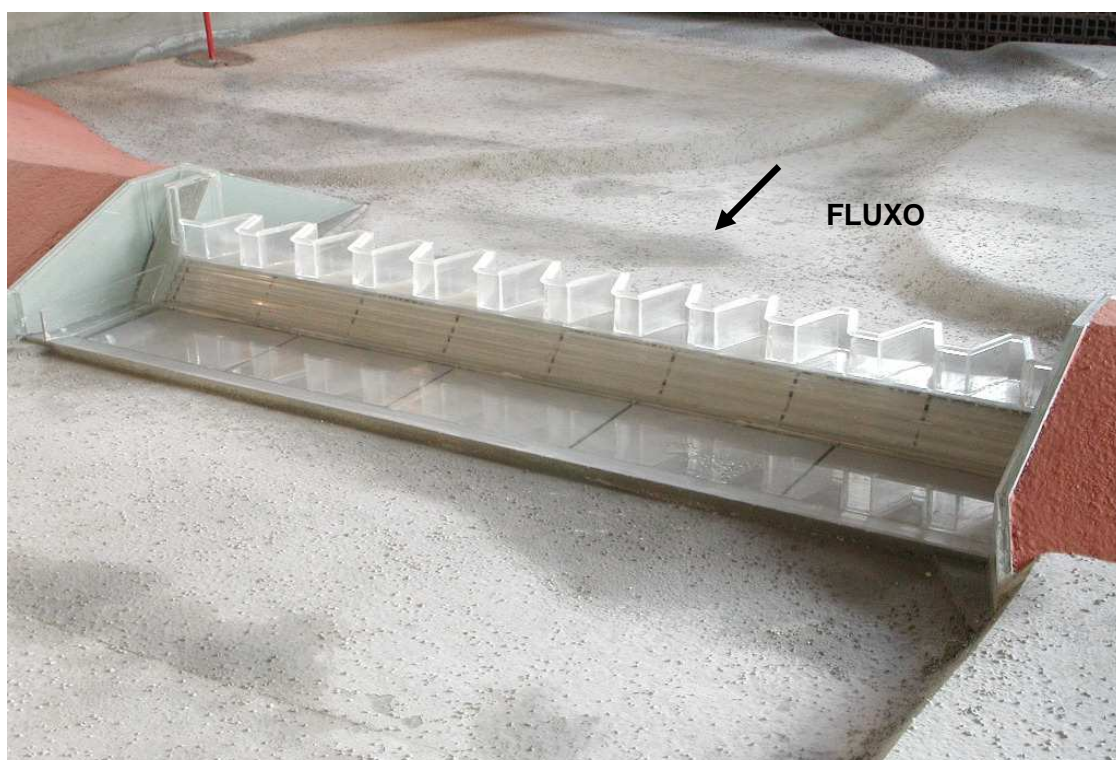


FIGURA 5.9 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO DA PCH BOCAIÚVA.

Conforme apresentado, foram realizados 13 ensaios em cada das alternativas de *layout* da crista avaliadas e, a partir da leitura do nível do reservatório determinou-se a carga sobre a crista para cada uma das vazões estabelecidas.

Os resultados obtidos nos estudos realizados no modelo reduzido estão apresentados no item a seguir.

5.2 Resultados

5.2.1 Caso Piloto – Vertedouro Labirinto da PCH Bocaiúva

A tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido do vertedouro labirinto do caso piloto avaliado. A figura 5.10 mostra a curva do coeficiente de descarga observado nesses ensaios.

TABELA 5.2 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO CASO PILOTO AVALIADO.

Teste	Imposição Vazão Prot.	Resultados NAR Prot.	Carga (m)	H/P	C	Cd
1	111,75	311,52	0,521	0,130	1,697	0,575
2	197,36	311,75	0,749	0,187	1,738	0,589
3	283,47	311,95	0,953	0,238	1,740	0,589
4	385,39	312,17	1,169	0,292	1,740	0,589
5	434,63	312,27	1,271	0,318	1,731	0,586
6	511,01	312,44	1,444	0,361	1,682	0,570
7	586,00	312,60	1,604	0,401	1,647	0,558
8	643,00	312,73	1,731	0,433	1,612	0,546
9	700,16	312,84	1,842	0,460	1,599	0,541
10	784,00	313,01	2,010	0,503	1,570	0,532
11	868,00	313,17	2,170	0,543	1,550	0,525
12	978,00	313,37	2,367	0,592	1,533	0,519
13	1088,00	313,59	2,586	0,646	1,494	0,506

A figura 5.10 evidencia uma das principais características do vertedouro labirinto que, quanto menor a carga sobre a crista, maior o coeficiente de descarga da estrutura. Com o aumento contínuo da carga, verifica-se o aumento da interferência da lâmina vertente, o que reduz o comprimento efetivo do vertedouro e, consequentemente, a capacidade de descarga.

É possível observar que, a partir de $H/P = 0,318$, o escoamento torna-se bastante complexo, e a instabilidade da lâmina vertente, causada pela constante entrada e saída de ar, reduz consideravelmente o coeficiente de descarga. A figura

5.11 mostra a instabilidade do escoamento que passa a “ignorar” parte do ciclo do vertedouro labirinto.

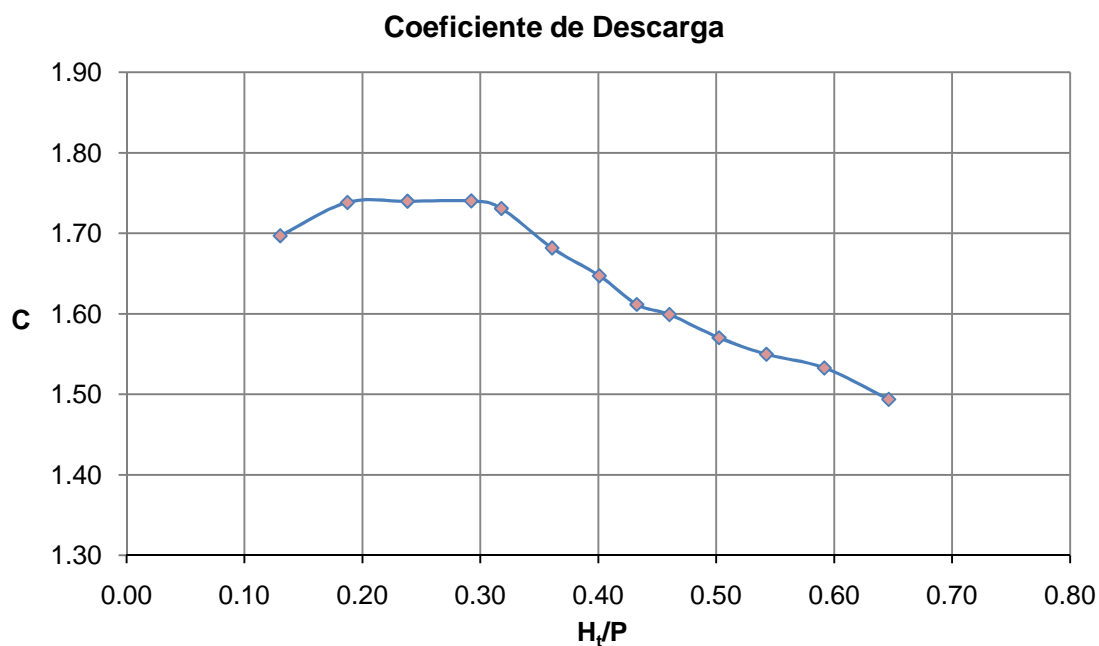


FIGURA 5.10 – CURVA DO COEFICIENTE DE DESCARGA OBSERVADO NOS TESTES REALIZADOS EM MODELO REDUZIDO – CASO PILOTO.

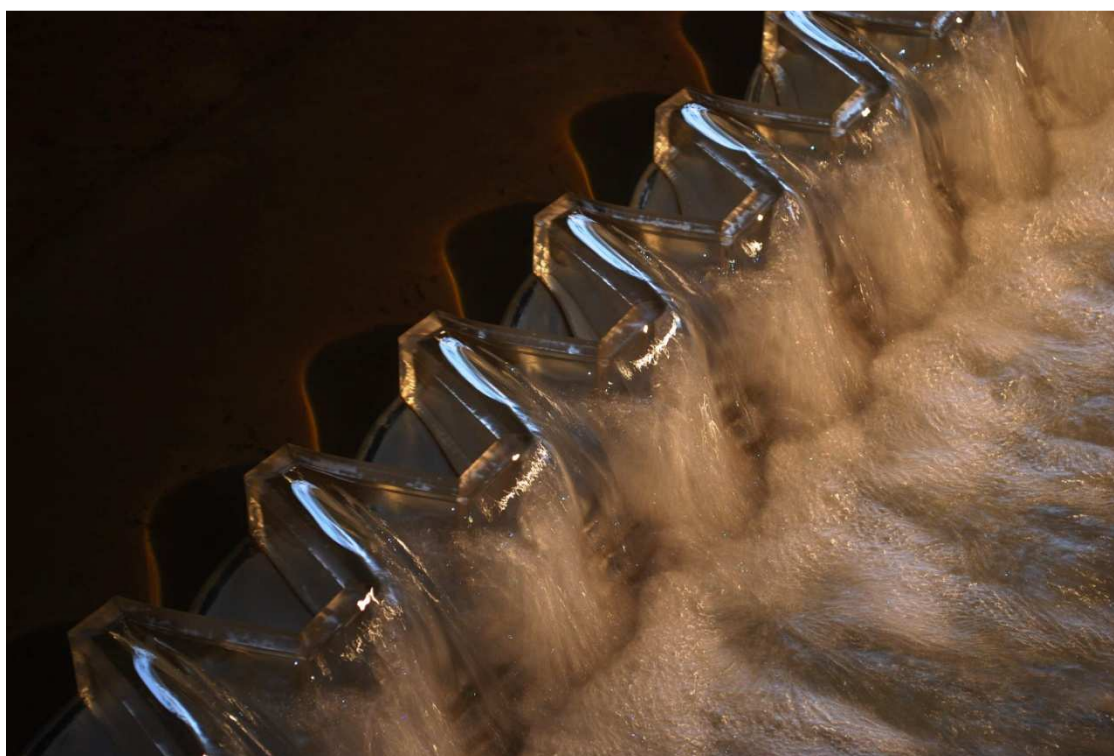


FIGURA 5.11 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO DO CASO PILOTO – ESCOAMENTO INSTÁVEL CAUSADO PELA FORTE TURBULÊNCIA DE JUSANTE ($H/P = 0,646$).

Os primeiros testes realizados, com H_t/P igual a 0,130 e 0,187, apresentaram boas condições de escoamento. No encontro dos escoamentos liberados pelos trechos de crista inclinados em relação ao eixo do vertedouro, observou-se a reflexão do escoamento no piso da base, resultando em um fluxo com a configuração de rabo de galo. Os dois primeiros testes apresentaram 12 rabos de galo bem definidos, conforme mostra a figura 5.12.



FIGURA 5.12 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOIRO LABIRINTO DO CASO PILOTO – ESCOAMENTO COM RABOS DE GALO BEM DEFINIDOS ($H_t/P = 0,187$).

Com o aumento da vazão, e consequentemente da relação H_t/P , o escoamento sobre a crista ocorreu com aeração deficiente em muitos pontos. Observou-se que a aeração plena seria muito difícil com a configuração estudada. Pode haver, portanto, o estabelecimento de pressão subatmosférica imediatamente a jusante da crista do vertedouro.

Entretanto, nos testes realizados com as maiores vazões, não foi observado o total afogamento do vertedouro devido à grande turbulência ocasionada pela intensidade dos jatos efluentes, que propicia a constante entrada de ar entre o escoamento e a estrutura, conforme mostra a figura 5.13.

Nas vazões mais elevadas observou-se que há descolamento do escoamento na crista, nos vértices de jusante do labirinto. Verificou-se que os rabos de galo observados nos primeiros testes se deformaram com o aumento da vazão.

Observou-se que uma parte do jato liberado pela crista atinge intensamente os degraus. Embora o escoamento não seja de alta vazão específica, há um considerável impacto do jato. O escoamento a jusante da estrutura de concreto é de baixa velocidade, devido a uma boa dissipação de energia cinética na queda dos jatos sobre os degraus e sobre a bacia constituída pela laje. Entretanto, não serão realizadas nesse estudo análises relacionadas à dissipação de energia e possíveis problemas de erosão a jusante do vertedouro.

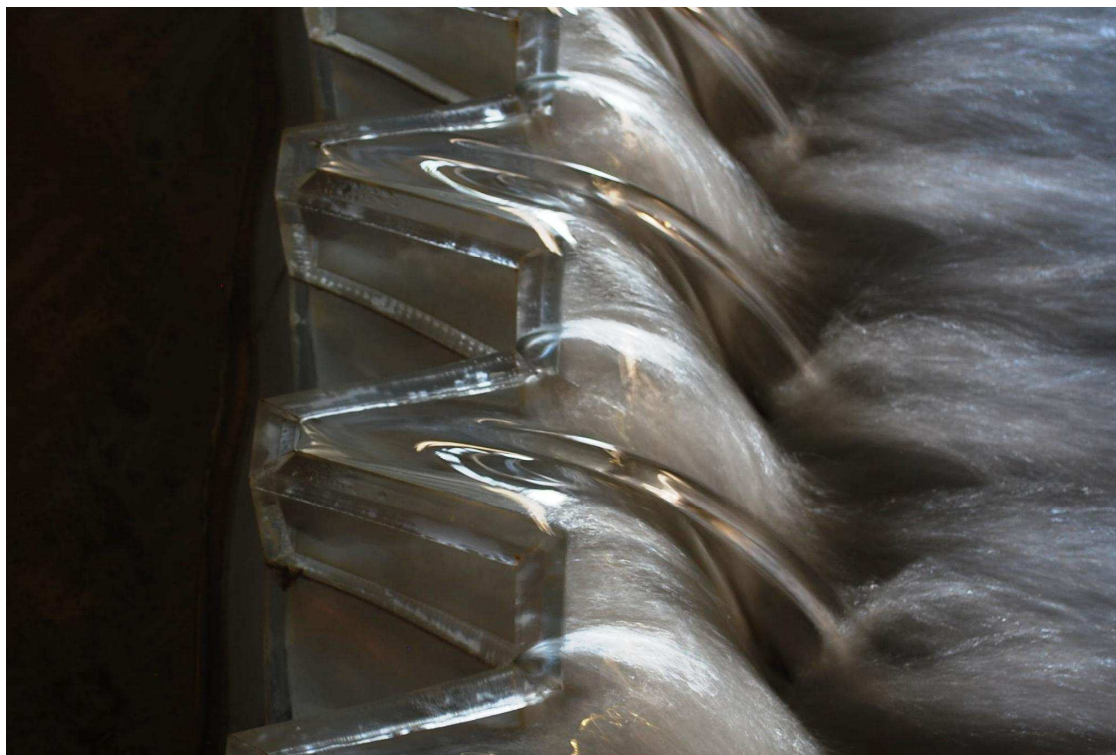


FIGURA 5.13 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO DO CASO PILOTO – AR INCORPORADO NO ESCOAMENTO DEVIDO A INTENSIDADE DO JATO EFLUENTE ($H_t/P = 0,592$).

5.2.2 Alternativa 1 – Vertedouro Labirinto com $N = 3$ ciclos

A tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido do vertedouro labirinto com *layout* formado por três ciclos. A figura 5.14 mostra a curva do coeficiente de descarga observado nesses ensaios.

TABELA 5.3 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO MODELO REDUZIDO COM N = 3 CICLOS.

Teste	Imposição Vazão Prot.	Resultados NAR Prot.	Carga (m)	H/P	C	Cd
1	111,75	311,51	0,508	0,127	1,762	0,597
2	197,36	311,72	0,717	0,179	1,855	0,628
3	283,47	311,91	0,911	0,228	1,861	0,630
4	385,39	312,12	1,116	0,279	1,867	0,632
5	434,63	312,21	1,208	0,302	1,867	0,632
6	511,01	312,35	1,348	0,337	1,864	0,631
7	586,00	312,46	1,460	0,365	1,896	0,642
8	643,00	312,55	1,552	0,388	1,898	0,643
9	700,16	312,64	1,644	0,411	1,896	0,642
10	784,00	312,77	1,772	0,443	1,897	0,642
11	868,00	312,91	1,908	0,477	1,880	0,637
12	978,00	313,08	2,084	0,521	1,855	0,628
13	1088,00	313,27	2,272	0,568	1,813	0,614

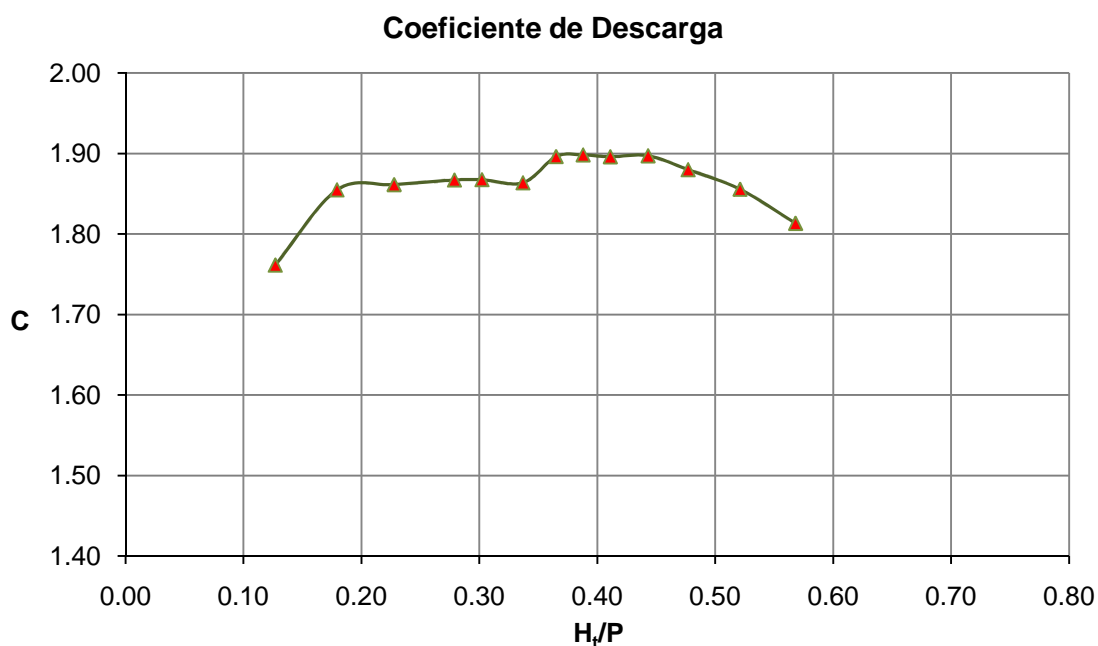


FIGURA 5.14 – CURVA DO COEFICIENTE DE DESCARGA OBSERVADO NOS TESTES REALIZADOS EM MODELO REDUZIDO – N = 3 CICLOS.

Nos testes realizados com a estrutura de geometria com três ciclos (N = 3), foi possível observar os maiores coeficientes de descarga dentre as opções apresentadas. Esse fato pode ser atribuído à reduzida interferência sofrida pelo jato efluente ao passar pela crista do vertedouro, devido geometria em planta que proporciona um maior comprimento efetivo.

Por apresentar um *layout* em planta com poucos vértices e com geometria semelhante a forma triangular, o jato efluente escoava pela crista em labirinto com três ciclos utilizando praticamente todo seu comprimento, até mesmo para as vazões maiores, como mostra a figura 5.15.

A estrutura, entretanto, se mostrou deficiente quanto à aeração do jato efluente para valores de H_t/P maiores que 0,34. Partes do escoamento apresentam pequenos bolsões de ar junto à parede do vertedouro, tornando-se totalmente afogado a partir de H_t/P igual a 0,48. Nessas condições o escoamento possui características não condizentes com a segurança das estruturas hidráulicas por ocasionar, geralmente, oscilações, vibrações e pressões negativas junto ao vertedouro.

Através do uso de corante foi possível verificar claramente o escoamento praticamente afogado, como mostrado na figura 5.16. Nessa condição, o escoamento nos vértices de montante começa a se tornar suprimido, e para manter a aeração, o ar é extraído por baixo da lâmina vertente, formando um bolsão de ar ao longo da parede.

A figura 5.17 demonstra o escoamento totalmente afogado para $H_t/P = 0,521$. O surgimento de pressão subatmosférica em pontos da crista pode ser verificado graficamente na curva do coeficiente de descarga observado na estrutura com três ciclos. O salto existente no valor do coeficiente entre H_t/P igual a 0,34 e 0,36 demonstram o repentino aumento da capacidade de descarga em consequência do estabelecimento de pressões negativas.

Outra questão relevante ligada às dificuldades construtivas para essa opção, é o fato de se necessitar uma área relativamente grande para a construção do vertedouro com 3 ciclos, visto que o comprimento da estrutura na direção do escoamento é o maior dentre as opções estudadas.



FIGURA 5.15 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO N = 3 CICLOS – ESCOAMENTO UTILIZANDO PRATICAMENTE TODO O COMPRIMENTO DA CRISTA ($H_t/P = 0,477$).



FIGURA 5.16 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO N = 3 CICLOS – ESCOAMENTO PRATICAMENTE AFOGADO ($H_t/P = 0,443$).



FIGURA 5.17 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO N = 3 CICLOS – ESCOAMENTO TOTALMENTE AFOGADO ($H_t/P = 0,521$).

5.2.3 Alternativa 2 – Vertedouro Labirinto com N = 6 ciclos

A tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido do vertedouro labirinto com *layout* formado por seis ciclos. A figura 5.18 mostra a curva do coeficiente de descarga observado nesses ensaios.

TABELA 5.4 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO MODELO REDUZIDO COM N = 6 CICLOS.

Teste	Imposição Vazão Prot.	Resultados NAR Prot.	Carga (m)	H/P	C	Cd
1	111,75	311,52	0,516	0,129	1,721	0,583
2	197,36	311,72	0,721	0,180	1,839	0,623
3	283,47	311,91	0,913	0,228	1,855	0,628
4	385,39	312,12	1,121	0,280	1,852	0,627
5	434,63	312,21	1,215	0,304	1,853	0,628
6	511,01	312,35	1,351	0,338	1,857	0,629
7	586,00	312,48	1,484	0,371	1,850	0,627
8	643,00	312,58	1,580	0,395	1,848	0,626
9	700,16	312,68	1,676	0,419	1,842	0,624
10	784,00	312,81	1,808	0,452	1,841	0,623
11	868,00	312,94	1,940	0,485	1,834	0,621
12	978,00	313,12	2,120	0,530	1,808	0,612
13	1088,00	313,30	2,300	0,575	1,780	0,603

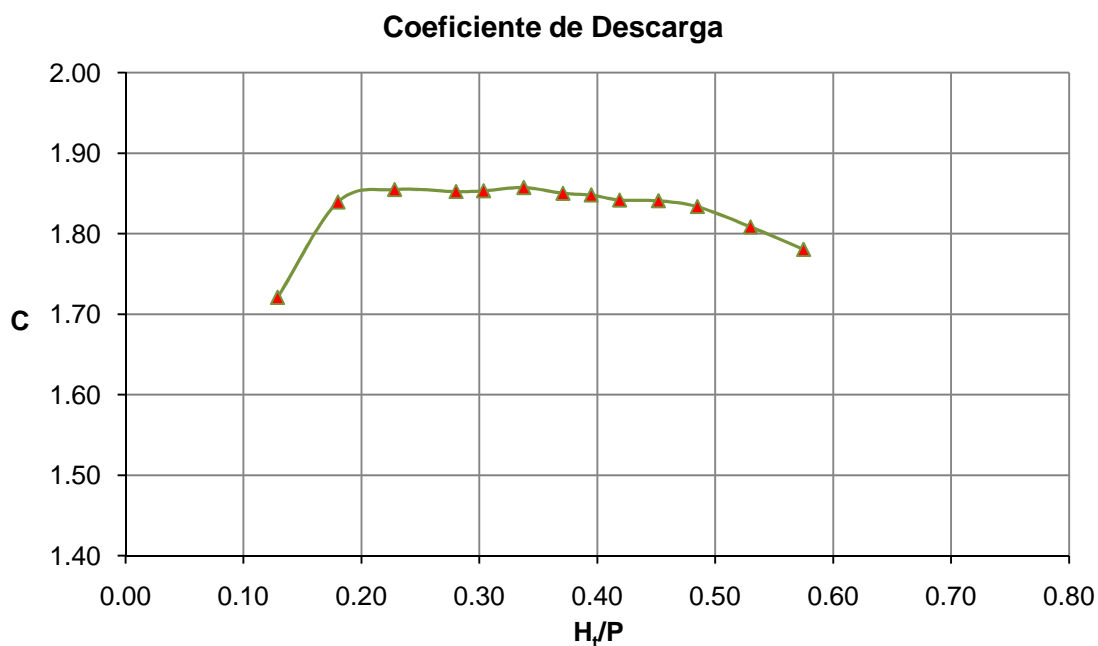


FIGURA 5.18 – CURVA DO COEFICIENTE DE DESCARGA OBSERVADO NOS TESTES REALIZADOS EM MODELO REDUZIDO – $N = 6$ CICLOS.

Os testes na opção de seis ciclos ($N = 6$) resultaram coeficientes de descarga mais constantes para a maioria das vazões ensaiadas. Entretanto, se comparados com os coeficientes da estrutura com três ciclos, os valores observados foram inferiores.

Testes com vazões baixas tiveram escoamento bem comportados, com rabos de galo simétricos e definidos, como pode ser observado na figura 5.19. O surgimento desse fenômeno ocorreu entre H_t/P igual a 0,18 e 0,34, ocasionados pela reflexão do jato efluente ao se chocar contra o piso na região do vértice responsável pela convergência do escoamento. Com o contínuo aumento da vazão os “rabos de galo” apresentaram comportamento assimétrico e disforme.

O jato efluente passou a se comportar de forma agitada, com entradas e saídas de ar de forma desordenada, a partir de H_t/P igual a 0,31. A figura 5.20 mostra a instabilidade da lâmina vertente.

O escoamento apresentou um contínuo aumento da turbulência tornando-se totalmente afogado a partir de H_t/P 0,47, conforme a figura 5.21. A ocorrência da pressão negativa não contribuiu consideravelmente para o aumento do coeficiente de descarga visto que, para cenários com altos valores da relação H_t/P , o desempenho do vertedouro labirinto diminui.



FIGURA 5.19 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO N = 6 CICLOS – RABOS DE GALO SIMÉTRICOS ($H_t/P = 0,307$).

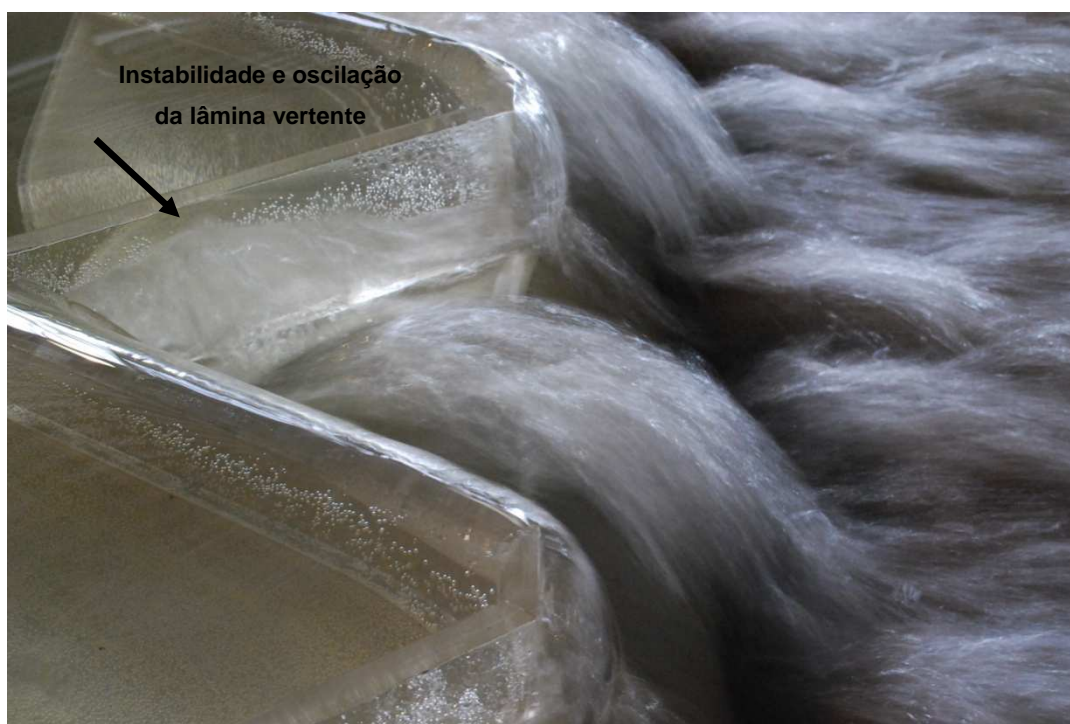


FIGURA 5.20 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO N = 6 CICLOS – INSTABILIDADE E OSCILAÇÃO DO JATO EFLUENTE ($H_t/P = 0,341$).



FIGURA 5.21 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOIRO LABIRINTO N = 6 CICLOS – INSTABILIDADE E OSCILAÇÃO DO JATO EFLUENTE ($H_t/P = 0,341$).

5.2.4 Alternativa 3 – Vertedouro Labirinto com N = 9 ciclos

A tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido do vertedouro labirinto com *layout* formado por nove ciclos. A figura 5.22 mostra a curva do coeficiente de descarga observado nesses ensaios.

TABELA 5.5 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO MODELO REDUZIDO COM N = 9 CICLOS.

Teste	Imposição Vazão Prot.	Resultados NAR Prot.	Carga (m)	H/P	C	Cd
1	111,75	311,52	0,517	0,129	1,716	0,581
2	197,36	311,73	0,730	0,183	1,806	0,612
3	283,47	311,93	0,927	0,232	1,812	0,614
4	385,39	312,14	1,139	0,285	1,811	0,613
5	434,63	312,23	1,230	0,307	1,819	0,616
6	511,01	312,36	1,362	0,341	1,835	0,621
7	586,00	312,50	1,496	0,374	1,828	0,619
8	643,00	312,61	1,612	0,403	1,793	0,607
9	700,16	312,72	1,724	0,431	1,765	0,598
10	784,00	312,88	1,884	0,471	1,730	0,586
11	868,00	313,04	2,036	0,509	1,705	0,578
12	978,00	313,25	2,248	0,562	1,656	0,561
13	1088,00	313,45	2,452	0,613	1,617	0,548

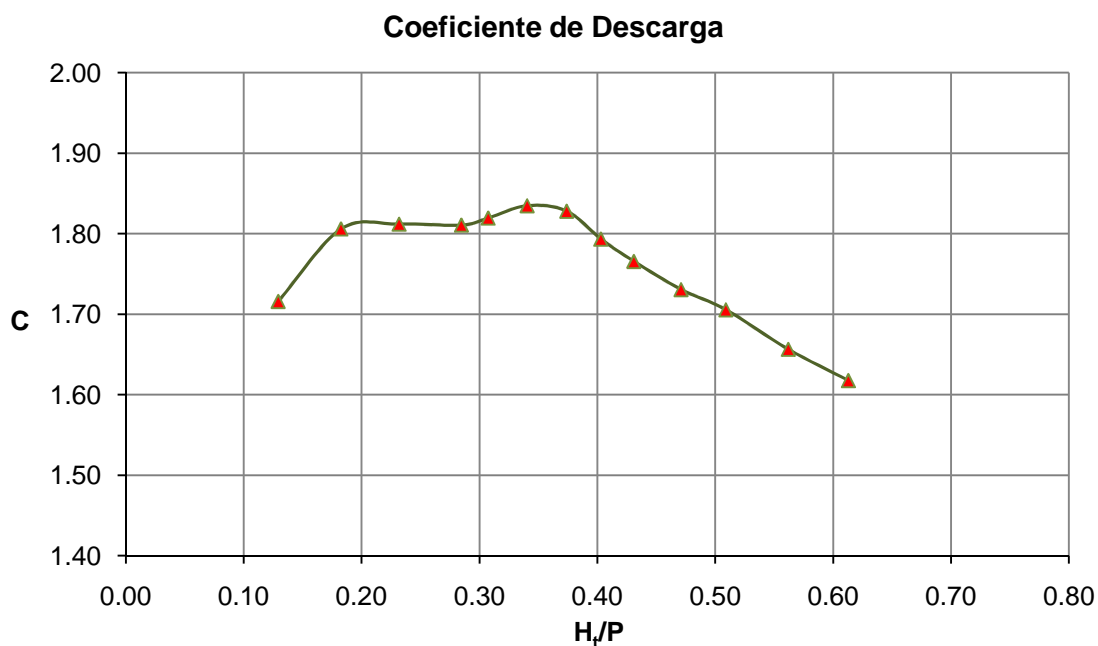


FIGURA 5.22 – CURVA DO COEFICIENTE DE DESCARGA OBSERVADO NOS TESTES REALIZADOS EM MODELO REDUZIDO – N = 9 CICLOS.

A estrutura com nove ciclos ($N = 9$) apresentou um comportamento que difere dos resultados das outras opções ensaiadas no que diz respeito à aeração. Não ocorreu o total afogamento do vertedouro em nenhuma das vazões. Entretanto, a partir de H/P igual a 0,31 foram observadas constantes oscilações e instabilidades de escoamento junto às estruturas do vertedouro devido à entrada e saída de ar nesse fluxo efluente. A figura 5.23 mostra a instabilidade da lâmina vertente.

Diferente do obtido nas outras estruturas ($N = 3$ e $N = 6$), o formato da curva do coeficiente de descarga apresentou um comportamento semelhante ao ábaco proposto por TULLIS *et al.* (1995). Contudo, as perdas de comprimento efetivo e a grande interferência da lâmina vertente, causada pela geometria da crista, reduziram a capacidade de descarga da estrutura e, conseqüentemente, os coeficientes de descarga foram menores que as opções anteriores. Para altos valores da relação H/P o escoamento “ignora” a geometria trapezoidal do vertedouro labirinto e a estrutura passa a se comportar de maneira semelhante a um vertedouro retilíneo convencional, conforme figura 5.24.



FIGURA 5.23 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO N = 9 CICLOS – INSTABILIDADE DA LÂMINA VERTENTE ($H_t/P = 0,307$).



FIGURA 5.24 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO N = 9 CICLOS – PERDA CONSIDERÁVEL DE COMPRIMENTO EFETIVO DEVIDO A GEOMETRIA DA CRISTA PARA ALTOS VALORES DA RELAÇÃO H_t/P ($H_t/P = 0,613$).

5.2.5 Alternativa 4 – Vertedouro Labirinto com N = 12 ciclos

A tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido do vertedouro labirinto com *layout* formado por doze ciclos. A figura 5.25 mostra a curva do coeficiente de descarga observado nesses ensaios.

Os testes realizados na estrutura com doze ciclos ($N = 12$) podem ser comparados diretamente com os obtidos no caso piloto avaliado. As duas estruturas apresentam geometria em planta com o mesmo número de ciclos. Porém, deve se destacar que o projeto piloto se distingue do projeto da estrutura com $N = 12$ no formato do trapézio e no perfil da crista, como explicado anteriormente.

Os resultados dos testes com $N = 12$ se mostraram mais satisfatórios do que os valores obtidos do projeto piloto devido a melhor configuração da geometria do trapézio, o que favoreceu um melhor comportamento do jato efluente nas regiões de convergência.

Entretanto, devido ao grande número de ciclos existente nesta opção, o comprimento efetivo do vertedouro apresentou o menor valor dentre os outros *layouts* estudados (conforme apresentado na tabela 5.1), o que refletiu um coeficiente de descarga menor.

TABELA 5.6 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO MODELO REDUZIDO COM $N = 12$ CICLOS.

Teste	Imposição Vazão Prot.	Resultados NAR Prot.	Carga (m)	H/P	C	Cd
1	111,75	311,52	0,519	0,130	1,706	0,578
2	197,36	311,73	0,733	0,183	1,795	0,608
3	283,47	311,93	0,928	0,232	1,810	0,613
4	385,39	312,14	1,139	0,285	1,811	0,613
5	434,63	312,25	1,248	0,312	1,779	0,603
6	511,01	312,43	1,432	0,358	1,702	0,576
7	586,00	312,59	1,588	0,397	1,671	0,566
8	643,00	312,70	1,700	0,425	1,656	0,561
9	700,16	312,82	1,824	0,456	1,622	0,549
10	784,00	313,00	2,004	0,501	1,577	0,534
11	868,00	313,17	2,168	0,542	1,552	0,526
12	978,00	313,36	2,364	0,591	1,536	0,520
13	1088,00	313,59	2,588	0,647	1,492	0,505

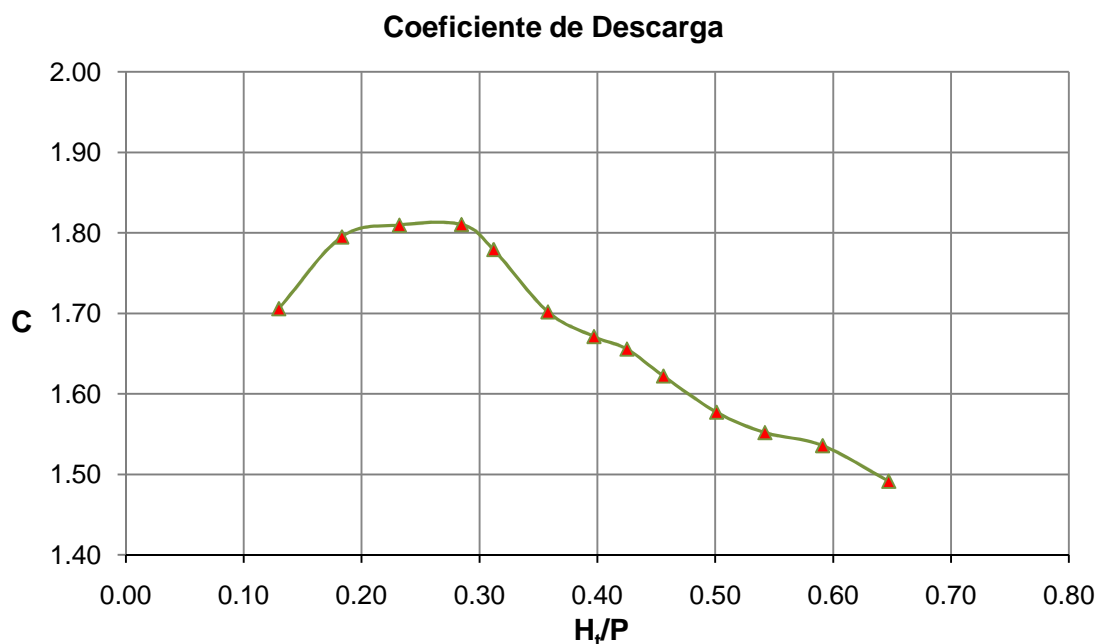


FIGURA 5.25 – CURVA DO COEFICIENTE DE DESCARGA OBSERVADO NOS TESTES REALIZADOS EM MODELO REDUZIDO – $N = 12$ CICLOS.

Inicialmente, nos ensaios com H/P menores que 0,28, a estrutura com 12 ciclos apresentou comportamento análogo aos testes realizados no vertedouro com 9 ciclos. Isso se deve principalmente ao fato de que para pequenas vazões, o comprimento efetivo da crista não apresenta reduções significativas devido à sua geometria. Nesse caso, a diferença das dimensões do ciclo das estruturas com nove e com doze ciclos são relativamente pequenas, se comparada às outras opções de *layout* ($N = 3$ e $N = 6$). A figura 5.26 mostra escoamento calmo e totalmente aerado, com a presença de rabos de galo simétricos.

A partir de H/P igual a 0,36 o comportamento do escoamento no caso piloto e na estrutura com $N = 12$ se mostraram semelhantes. Nesses cenários o escoamento se apresentou mais turbulento, com a constante entrada e saída de ar entre o fluxo efluente e as estruturas a jusante do vertedouro, ocasionando constantes oscilações e instabilidades de escoamento.

O comportamento dos “rabos de galo” também foi semelhante ao apresentado pelo caso piloto, diminuindo de intensidade à medida que a vazão aumenta, permanecendo simétricos e bem formados até H/P igual a 0,31.

Os problemas relativos à deficiência de aeração observados no caso piloto também pode ser verificado na estrutura com 12 ciclos. A diferença, entretanto, é que mesmo sob baixas vazões a estrutura do caso piloto já apresentava escoamento instável e grande interferência da lâmina vertente. Na opção com 12

ciclos, esse comportamento pôde ser observado a partir de H_t/P igual 0,31. Nos testes realizados com as maiores vazões, não foi verificado o total afogamento do vertedouro devido grande turbulência ocasionada pela intensidade dos jatos efluentes, que propicia a constante entrada de ar entre o escoamento e a estrutura, conforme a figura 5.27. Este comportamento pode ser comparado ao apresentado pelo caso piloto, ilustrado na figura 5.13.



FIGURA 5.26 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO N = 12 CICLOS – ESCOAMENTO CALMO E TOTALMENTE AERADO ($H_t/P = 0,183$).



FIGURA 5.27 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO N = 12 CICLOS – AR INCORPORADO NO ESCOAMENTO DEVIDO A INTENSIDADE DO JATO EFLUENTE ($H_t/P = 0,591$).

5.2.6 Considerações a respeito do estudo de alternativas de layout da crista

Após a realização de todos os ensaios em modelo reduzido foi possível confrontar o comportamento das quatro alternativas avaliadas, frente ao vertedouro labirinto da PCH Bocaiúva, utilizado como caso piloto. A figura 5.28 mostra as curvas dos coeficientes de descarga obtidas experimentalmente nos testes realizados no caso piloto e nas quatro propostas de *layout*.

Como apresentado anteriormente, a alternativa de *layout* com três ciclos apresentou os maiores coeficientes de descarga. Como previsto pelos estudos teóricos, quanto menor o número de ciclos, para uma mesma relação L/W , maior será o comprimento efetivo e, conseqüentemente, maior será a capacidade de descarga da estrutura.

Considerando os aspectos analisados neste estudo, referente à capacidade de descarga e aeração do escoamento, entende-se que, por apresentar coeficientes de descarga concisos e relativamente elevados, e ainda poucos problemas de aeração, verificados apenas nos cenários para H_t/P maior que 0,50, a estrutura com seis ciclos é a melhor alternativa para o cenário em questão.

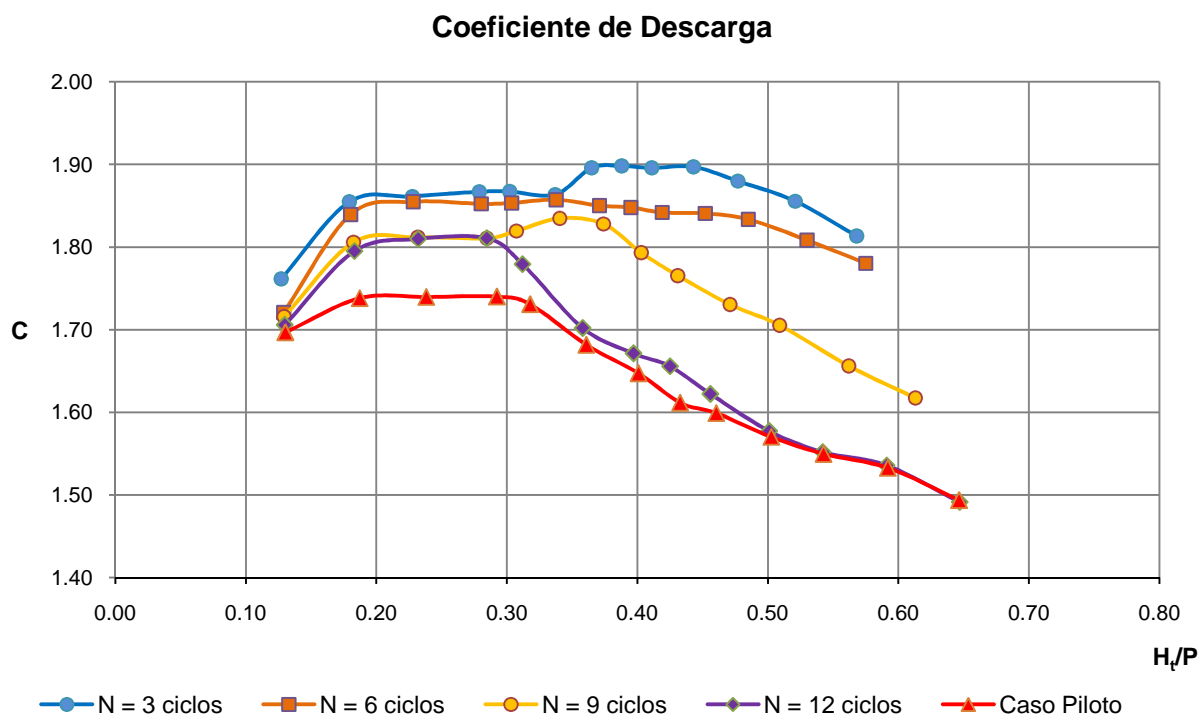


FIGURA 5.28 – COEFICIENTES DE DESCARGA OBSERVADOS NOS TESTES REALIZADOS EM MODELO REDUZIDO.

Entretanto, essa avaliação refere-se apenas aos aspectos hidráulicos. Em relação aos parâmetros construtivos, é necessária a realização de um estudo envolvendo os custos para a construção e implantação desta alternativa.

Com o intuito de resolver os problemas relativos à aeração do escoamento, e ainda possivelmente melhorar o coeficiente de descarga, através da redução da instabilidade da lâmina vertente, causada pela constante entrada e saída de ar, determinou-se uma nova alternativa para a estrutura com seis ciclos.

A partir da configuração original, foram propostas modificações na base do vertedouro onde está apoiada a crista em labirinto com seis ciclos. A nova estrutura avaliada mantém a base de montante conforme a original, e elimina a base de jusante, conforme ilustrado na figura 5.29.

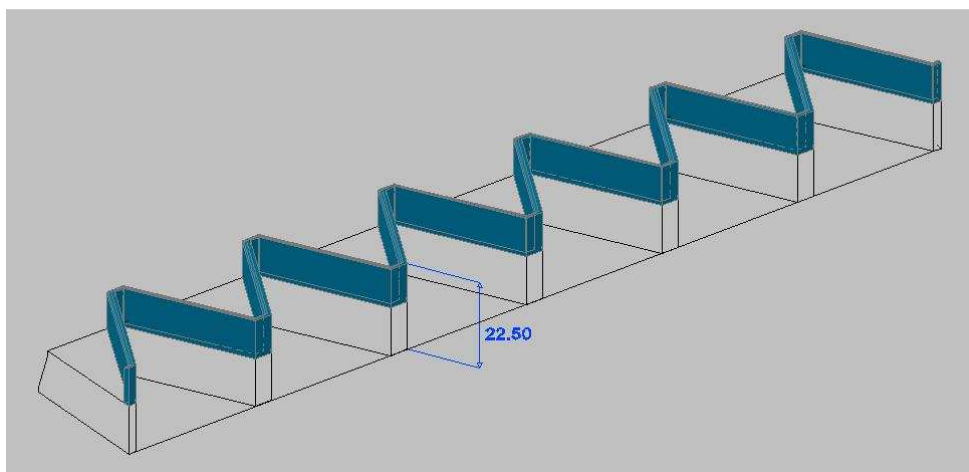


FIGURA 5.29 – REPRESENTAÇÃO NOVA PROPOSTAS DE *LAYOUT* PARA A ESTRUTURA COM SEIS CICLOS, SEM A BASE DE JUSANTE.

Como pode ser observada na figura, a altura da parede da crista torna-se maior, acrescentando 12,5 cm à altura $P = 10$ cm da configuração original, na parte jusante da crista. A figura 5.30 mostra o modelo reduzido construído para a realização de novos ensaios nesta alternativa.

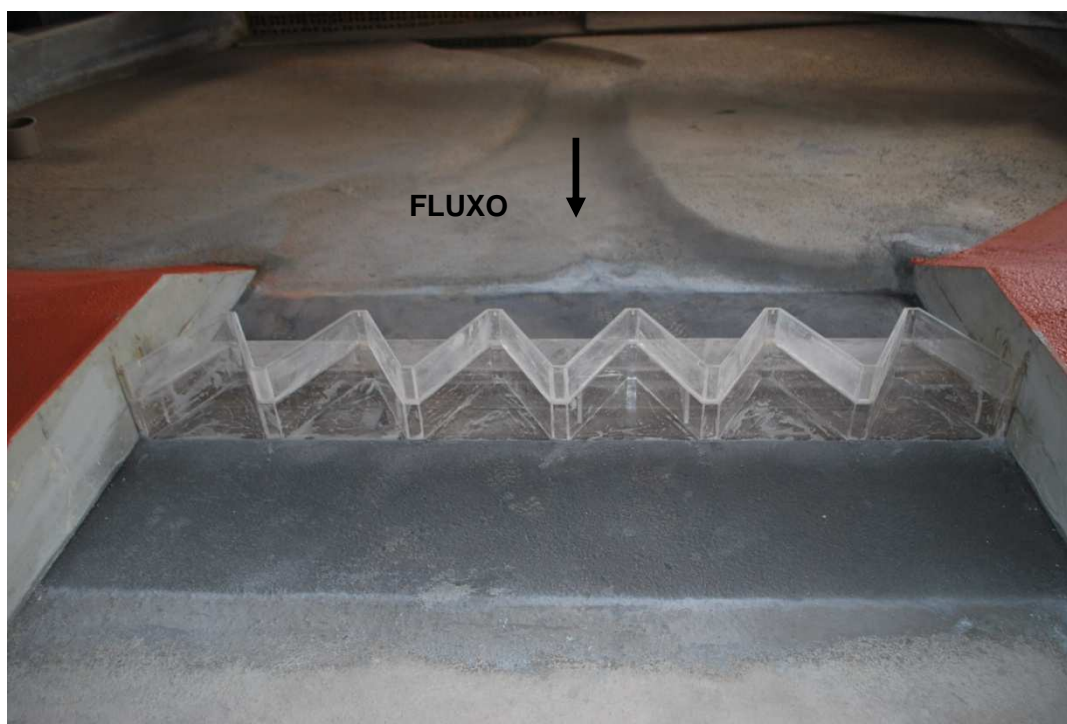


FIGURA 5.30 – MODELO REDUZIDO DA NOVA ALTERNATIVA COM $N = 6$ CICLOS SEM BASE DE JUSANTE.

Os resultados obtidos referentes aos testes realizados nesta nova estrutura são apresentados no item 5.2.7.

5.2.7 Alternativa 5 – Vertedouro Labirinto com N = 6 ciclos sem base a jusante

A tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido do vertedouro labirinto com *layout* formado por seis ciclos com a base modificada. A figura 5.31 mostra a curva do coeficiente de descarga observado nesses ensaios.

TABELA 5.7 – RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS NO MODELO REDUZIDO COM N = 6 CICLOS SEM BASE A JUSANTE.

Teste	Imposição Vazão Prot.	Resultados NAR Prot.	Carga (m)	H/P	C	Cd
1	111,75	311,48	0,479	0,120	1,923	0,651
2	197,36	311,68	0,680	0,170	2,007	0,680
3	283,47	311,86	0,864	0,216	2,015	0,682
4	385,39	312,08	1,077	0,269	1,967	0,666
5	434,63	312,18	1,179	0,295	1,939	0,657
6	511,01	312,32	1,323	0,331	1,917	0,649
7	586,00	312,46	1,456	0,364	1,904	0,645
8	643,00	312,55	1,554	0,388	1,895	0,642
9	700,16	312,65	1,652	0,413	1,882	0,637
10	784,00	312,80	1,800	0,450	1,853	0,628
11	868,00	312,94	1,940	0,485	1,834	0,621
12	978,00	313,12	2,120	0,530	1,808	0,612
13	1088,00	313,32	2,316	0,579	1,762	0,597

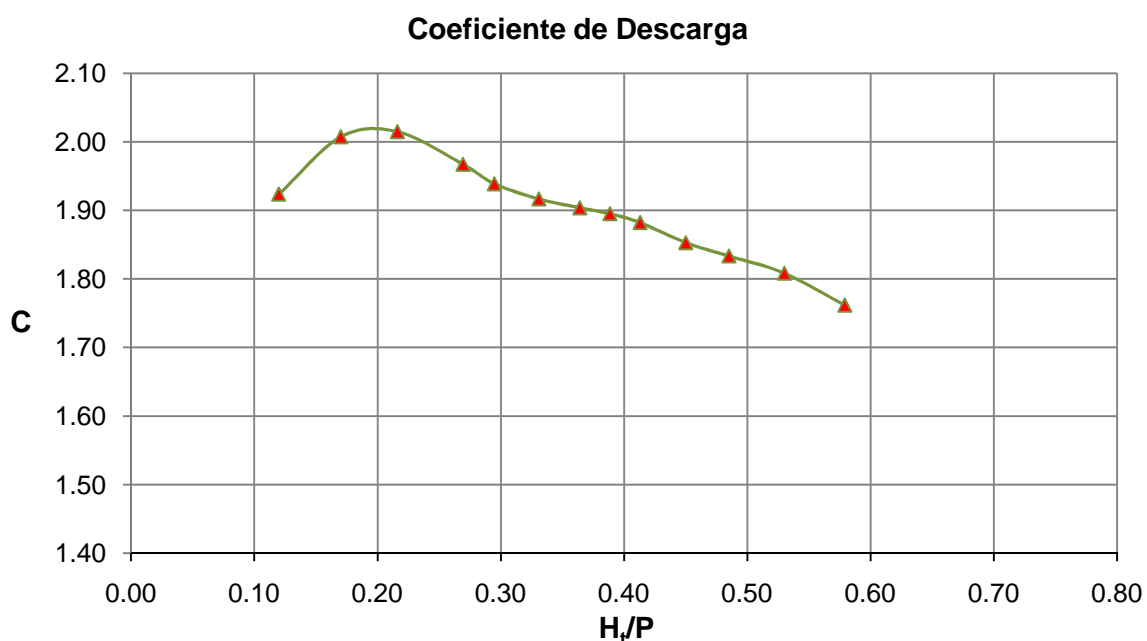


FIGURA 5.31 – CURVA DO COEFICIENTE DE DESCARGA OBSERVADO NOS TESTES REALIZADOS EM MODELO REDUZIDO – N = 6 CICLOS SEM BASE A JUSANTE.

Conforme apresentado no item 5.2.6, a nova estrutura proposta mantém a base a montante da crista inalterada e elimina a base a jusante. O aumento gerado na altura da face de jusante do vertedouro tem como o objetivo garantir a aeração do escoamento, mesmo submetido a maiores cargas.

A figura 5.32 compara as curvas do coeficiente de descarga observados no modelo reduzido constituído por seis ciclos com a base original, e na nova alternativa proposta sem a base na face jusante do vertedouro.

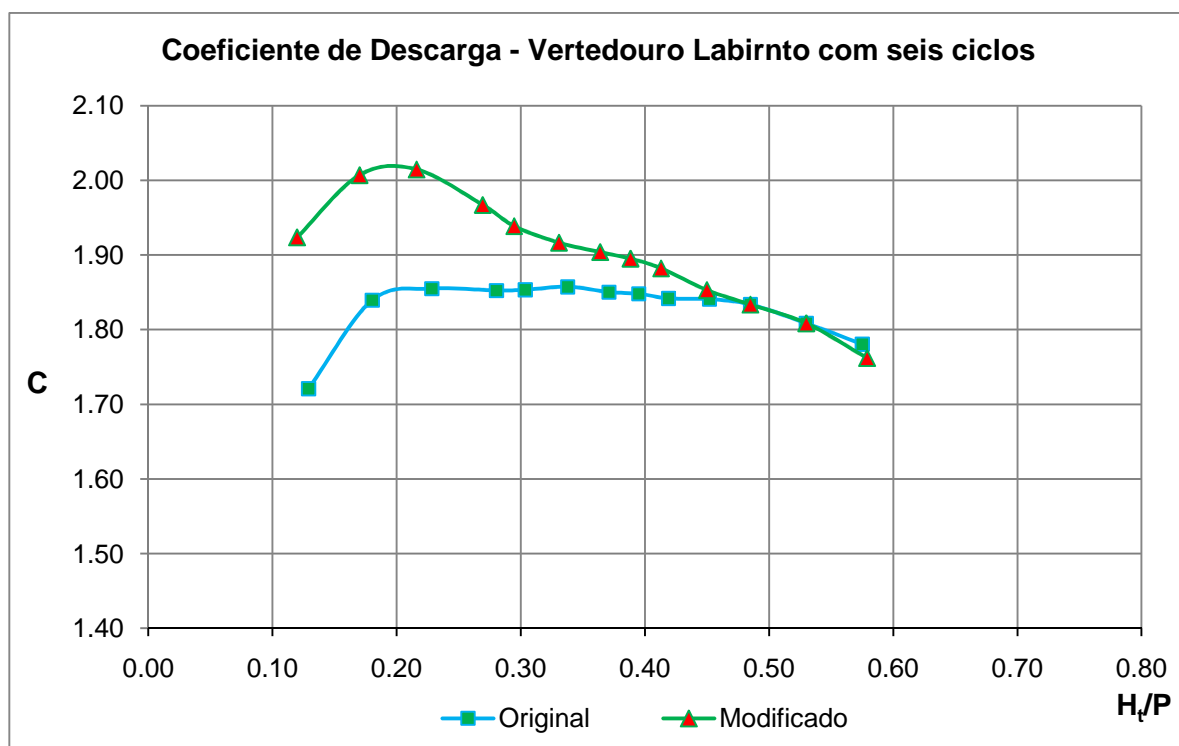


FIGURA 5.32 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DOS COEFICIENTES DE DESCARGA OBSERVADOS NOS TESTES REALIZADOS EM MODELO REDUZIDO COM SEIS CICLOS – COM A BASE ORIGINAL E SEM BASE A JUSANTE.

Como pode ser observado na figura acima, para H_t/P menor que 0,45, os coeficientes de descarga obtidos no ensaio realizado na nova alternativa foram significativamente maiores que a estrutura com seis ciclos original. Essa diferença foi ainda maior nas três primeiras vazões analisadas. O aumento gerado no coeficiente de descarga devido à modificação na estrutura foi de 12% no primeiro teste e 9% nos dois testes seguintes. Para valores de H_t/P maiores que 0,25 a diferença observada diminui gradativamente. A partir de H_t/P maior que 0,45 os coeficientes de descarga observados foram muito semelhantes nas duas estruturas.

A figura 5.33 mostra o escoamento com baixas cargas ($H_T/P = 0,12$ e $Q = 111,75 \text{ m}^3/\text{s}$), no qual a lâmina d'água adere à face jusante da parede do vertedouro, gerando um aumento no coeficiente de descarga. Entretanto, esta condição pode causar vibrações e, conseqüentemente, ruídos desagradáveis e flutuações de pressão nas paredes da crista em labirinto.

A figura 5.34 mostra o escoamento na estrutura com seis ciclos com a base original, com a lâmina d'água totalmente aerada para vazão de $111,75 \text{ m}^3/\text{s}$.



FIGURA 5.33 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOIRO LABIRINTO N = 6 CICLOS MODIFICADO – JATO EFLUENTE COLADO NA PAREDE DO VERTEDOIRO ($H_T/P = 0,120$).

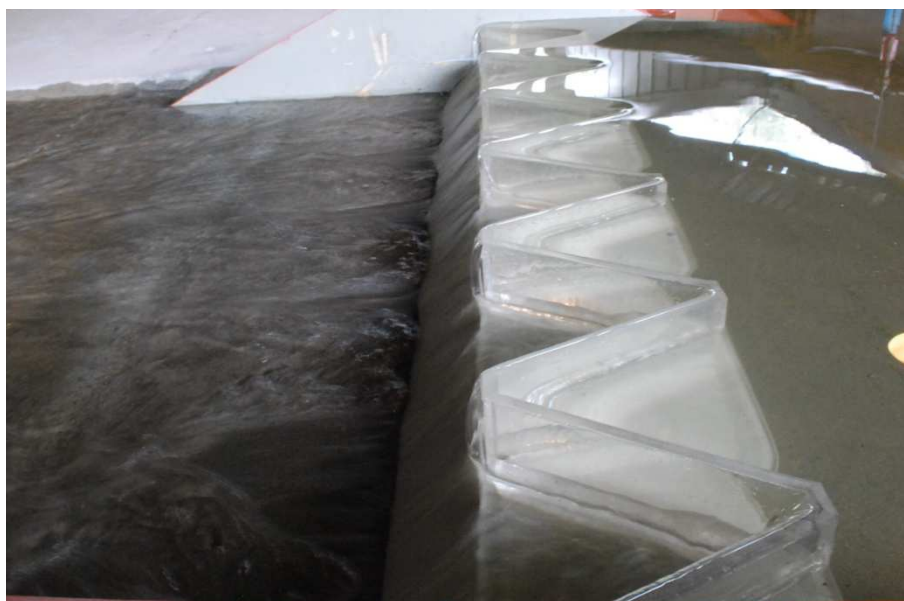


FIGURA 5.34 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOIRO LABIRINTO N = 6 CICLOS ORIGINAL – JATO EFLUENTE AERADO ($H_T/P = 0,129$).

Os problemas de aeração verificados no modelo original com seis ciclos não foram observados na nova estrutura. Em todos os testes realizados o jato efluente permaneceu totalmente aerado. A figura 5.35 evidencia este comportamento mesmo para a maior vazão analisada.

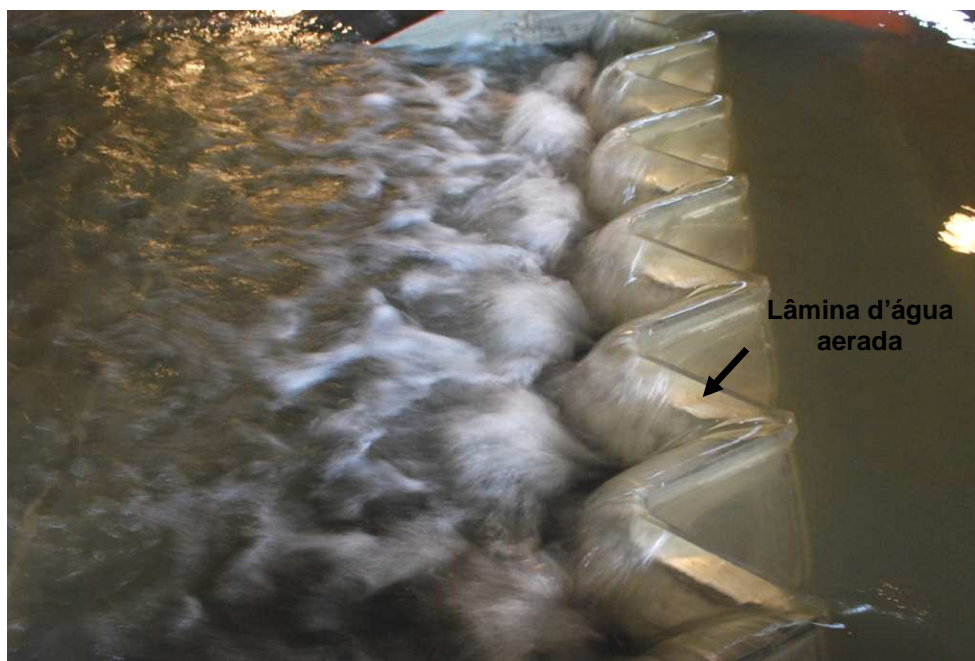


FIGURA 5.35 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO N = 6 CICLOS MODIFICADO – JATO EFLUENTE AERADO ($H_t/P=0,579$).

Nos testes realizados com H_t/P maiores que 0,30 foi possível verificar o início da interferência da lâmina vertente, que reduziu a capacidade de descarga da estrutura. A modificação realizada na base do vertedouro não altera a geometria da crista, e a redução do comprimento efetivo, causada pelo choque dos jatos efluentes nos vértices de montante da crista, começa a ser significativa. A figura 5.36 mostra o comportamento do escoamento para H_t/P igual a 0,33.

Com o aumento da vazão verifica-se a redução do coeficiente de descarga. O formato da curva do coeficiente de descarga da nova estrutura foi semelhante ao apresentado pelas cristas com nove e doze ciclos. Considerando que o escoamento não afoga em nenhum dos testes realizados, o aumento na capacidade de descarga devido ao estabelecimento da pressão subatmosférica não é verificado.

O modelo reduzido com seis ciclos original mostrou coeficientes mais constantes já que, a partir de H_t/P igual a 0,50, a lâmina d'água condiciona-se como não aerada, e a redução do coeficiente de descarga, causada pelo aumento da

carga, não é acentuada, se comparada aos testes em que não ocorre o total afogamento do jato efluente.

A figura 5.37 mostra os coeficientes de descarga obtidos em todas as alternativas avaliadas nesta pesquisa.



FIGURA 5.36 – MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO LABIRINTO N = 6 CICLOS MODIFICADO – INÍCIO DA INTERFERÊNCIA DA LÂMINA VERTENTE ($H_T/P=0,33$).

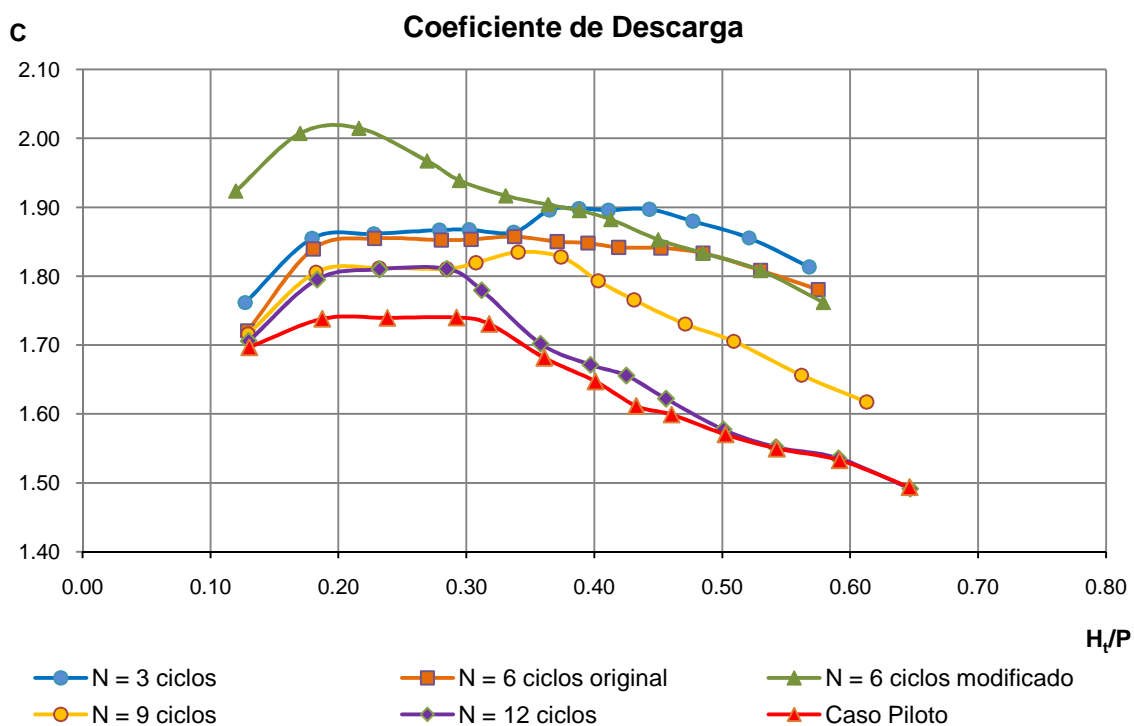


FIGURA 5.37 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DOS COEFICIENTES DE DESCARGA OBSERVADOS EM TODAS AS ALTERNATIVAS AVALIADAS.

A nova estrutura proposta reduziu os problemas de aeração verificados na crista com seis ciclos original, e aumentou significativamente a capacidade da estrutura, principalmente para valores de H_d/P menores que 0,45.

Avalia-se, portanto, a estrutura com seis ciclos modificada como a melhor alternativa estudada. Além de apresentar o melhor desempenho em relação aos parâmetros analisados, os custos gerados devido ao aumento do comprimento da base (na direção do escoamento – B) podem ser não ser representativos, já que boa parte do concreto utilizado na base do vertedouro não será mais necessária na nova proposta.

5.2.8 Comparação entre os resultados experimentais e teóricos

Finalmente, foram comparados os resultados experimentais obtidos nos ensaios em modelo reduzido, com aqueles teóricos apresentados no item 5.1.2, para a carga de projeto (H_d) do caso piloto, conforme colocado na tabela 5.1. A diferença percentual entre as vazões calculadas através das equações propostas por TULLIS *et al.* (1995) e aquelas observadas no modelo reduzido pode ser verificada abaixo (tabela 5.8).

TABELA 5.8 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES TEÓRICAS CALCULADAS E AS EXPERIMENTAIS OBSERVADAS NOS TESTES EM MODELO REDUZIDO (PARA $H_d = 2,00$ m).

N	α [°]	Le [m]	TULLIS <i>et al.</i> (1995)		EXPERIMENTAL		DIFERENÇA $\frac{Q_{Teórica}}{Q_{Experimental}}$
			Cd	Q [m³/s]	Cd	Q [m³/s]	
3	30°	170,54	0,675	962,02	0,636	931,00	3,33%
6a	28°	165,54	0,665	919,49	0,620	906,91	1,39%
6b	28°	165,54	0,665	919,49	0,621	908,74	1,18%
9	26°	160,14	0,653	873,89	0,580	848,45	3,00%
12	24°	154,22	0,631	813,08	0,536	784,04	3,70%

Considerando que o coeficiente de descarga teórico proposto por TULLIS *et al.* (1995) leva em conta apenas o comprimento efetivo da crista em labirinto, e o experimental é calculado com base no comprimento total, não foram comparados os valores deste parâmetro. Conforme apresentado no Capítulo II – Revisão Bibliográfica, no cálculo teórico já são consideradas as perdas no comprimento da

crista para estimar as vazões. Na análise experimental estas perdas são representadas diretamente no coeficiente de descarga.

Como pode ser observado na tabela acima, os valores obtidos experimentalmente foram inferiores aos valores teóricos arbitrados. Mesmo considerando a perda do comprimento total proposta por TULLIS *et al.* (1995), representada pelo parâmetro L_e , as vazões calculadas teoricamente foram razoavelmente maiores, principalmente para as estruturas com três e doze ciclos. Esta diferença pode ser atribuída em parte, aos parâmetros de dimensionamento L/W e w/P que estão ligeiramente fora das faixas de dimensionamento propostas pela bibliografia.

É importante ressaltar que, conforme colocado anteriormente, os valores de C_d apresentados por TULLIS *et al.* (1995) não foram obtidos experimentalmente para estruturas com perfil quarto de circunferência e com α maior que 18° . Na presente pesquisa, as estruturas avaliadas possuem α variando de 24° a 30° . Nesse sentido, observa-se a necessidade de verificar consistência deste coeficiente de descarga para estruturas com α maior que 18° .

A partir dos resultados que relacionam a vazão (Q) para uma dado nível de reservatório (NAR), obtidos nos ensaios realizados nas cinco alternativas propostas, foram comparadas as curvas de descarga experimentais, com as teóricas calculadas com base no estudo de TULLIS *et al.* (1995) em função de H/P e do ângulo α . As figuras 5.38 a 5.41 confrontam as curvas experimentais com as teóricas estimadas.

A comparação mostra que, para baixos valores de H/P , as vazões experimentais e teóricas foram muito semelhantes para as estruturas com 3 e 9 ciclos, e para estrutura com 6 ciclos original. Com o aumento da carga sobre a crista, os valores teóricos estimados tornam-se relativamente maiores que os experimentais observados. Já os resultados experimentais apresentados pelas estruturas com doze ciclos e com seis ciclos modificada foram maiores que os teóricos para vazões de até $450 \text{ m}^3/\text{s}$.

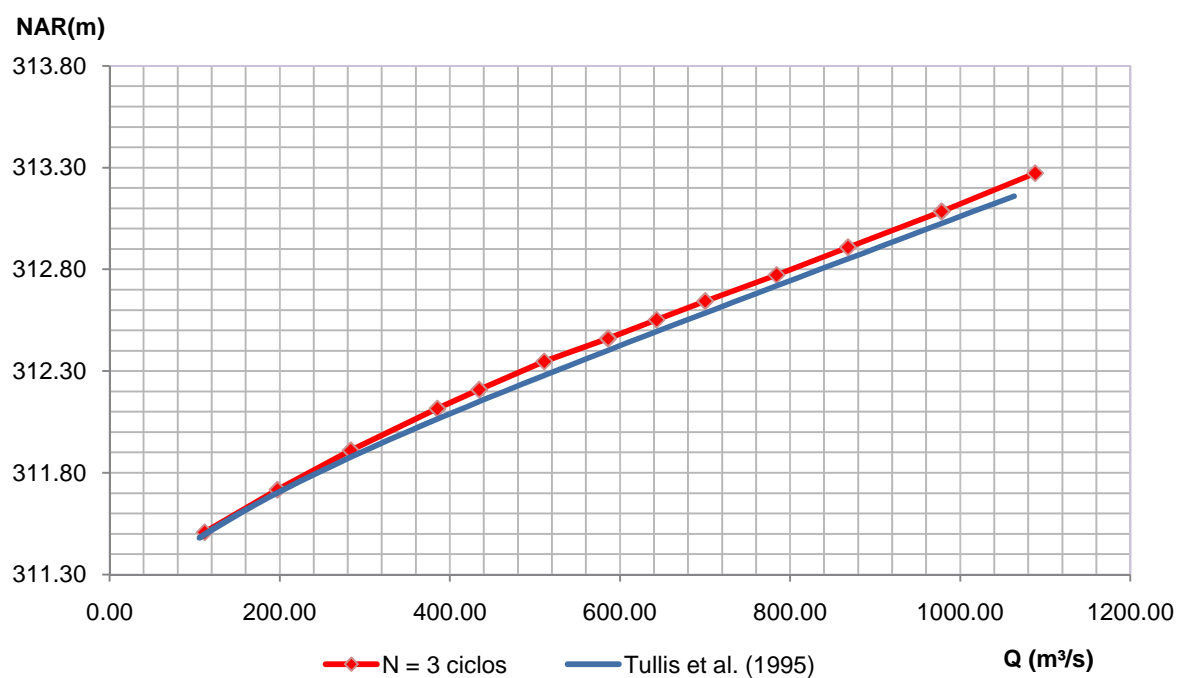


FIGURA 5.38 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE DESCARGA EXPERIMENTAL E TEÓRICA – $N = 3$ CICLOS
 $E \alpha = 30^\circ$.

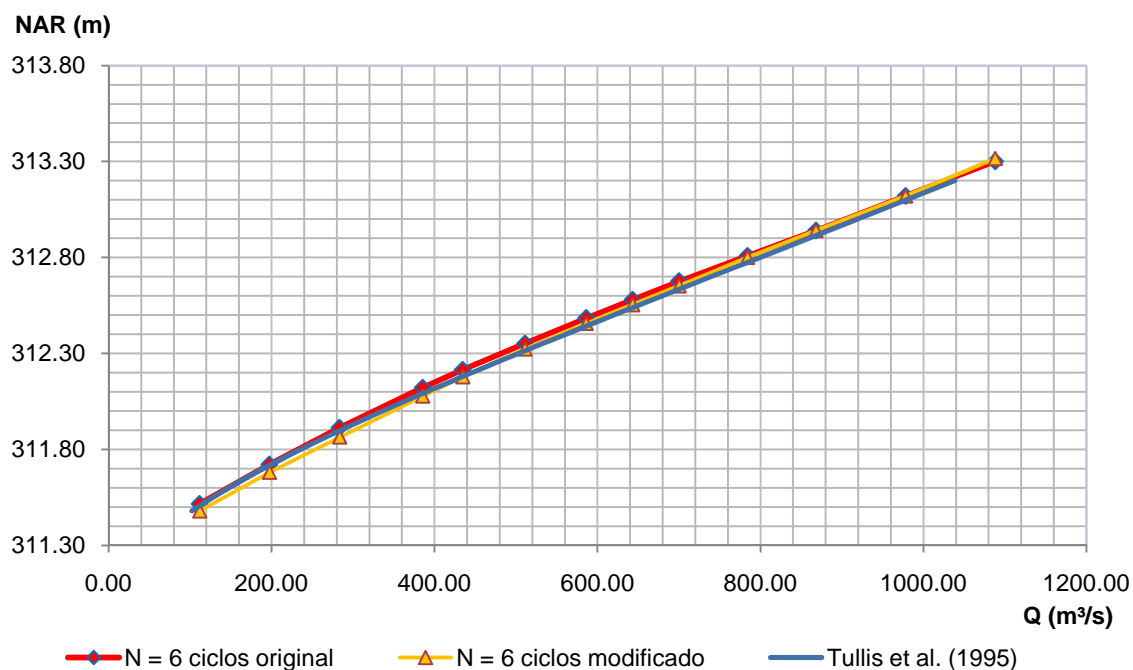


FIGURA 5.39 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE DESCARGA EXPERIMENTAL E TEÓRICA – $N = 6$ CICLOS
 $E \alpha = 28^\circ$.

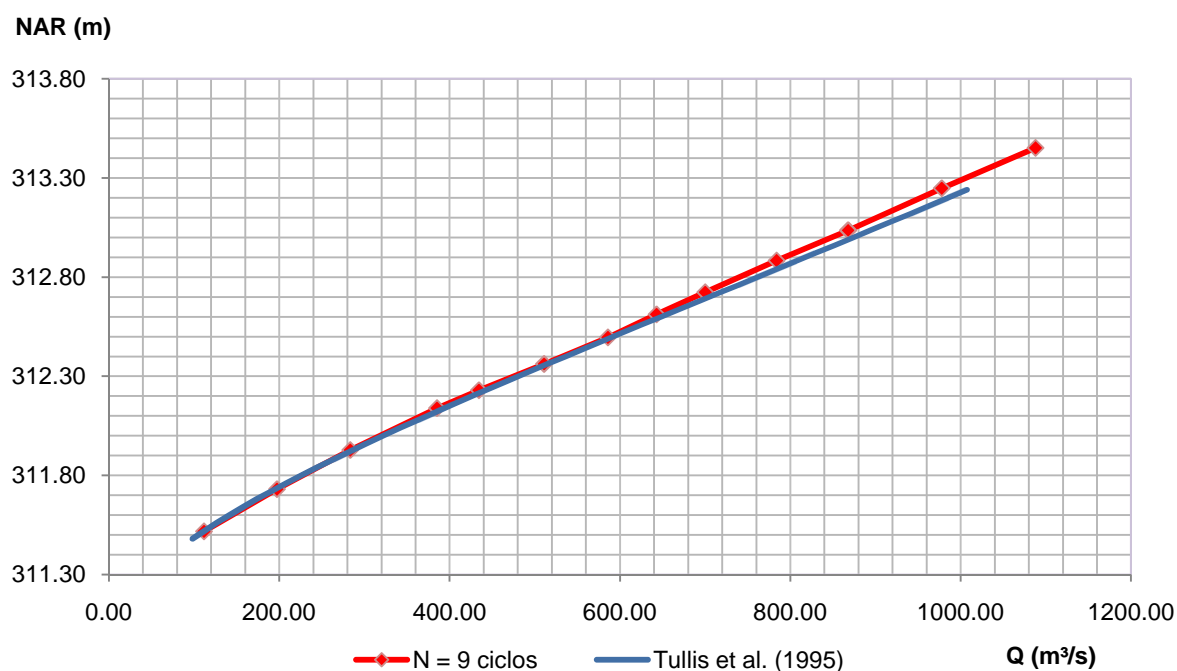


FIGURA 5.40 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE DESCARGA EXPERIMENTAL E TEÓRICA – $N = 9$ CICLOS
 $E \alpha = 26^\circ$.

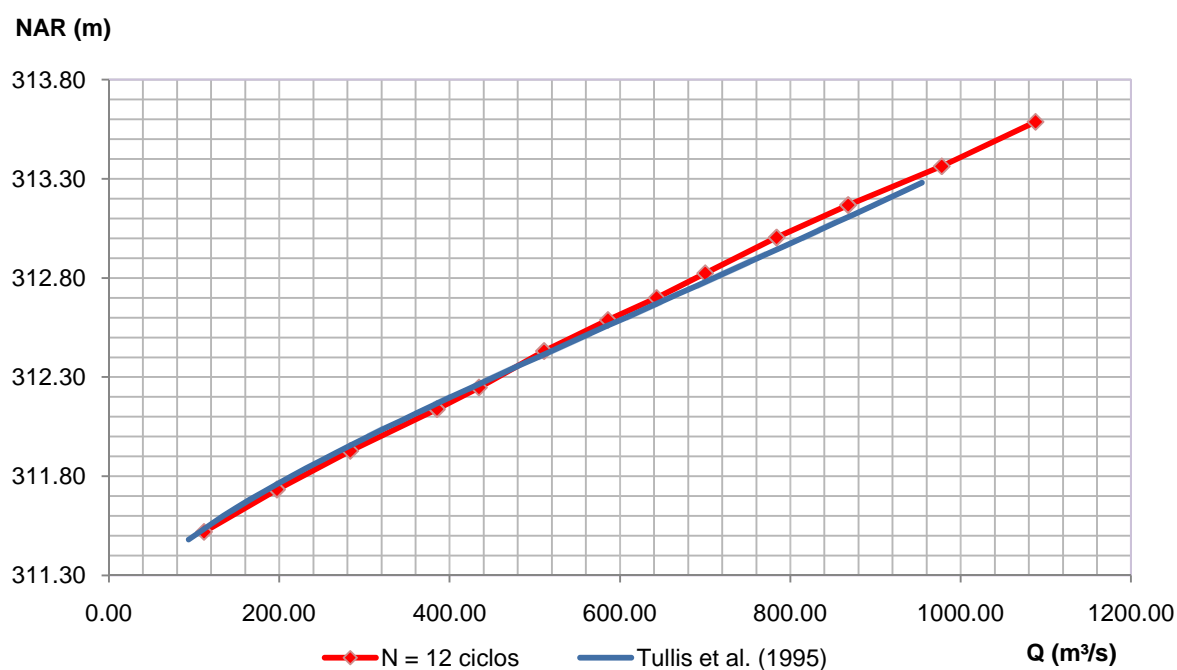


FIGURA 5.41 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE DESCARGA EXPERIMENTAL E TEÓRICA – $N = 12$ CICLOS
 $E \alpha = 24^\circ$.

6 CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com os resultados obtidos nas seqüências de testes realizados no canal prismático retangular, utilizando diferentes tipos e perfis de crista, foi possível definir alguns parâmetros para o projeto de vertedouros labirinto. Considerando as características avaliadas, capacidade de descarga e aeração, o perfil quarto de circunferência foi o mais eficiente.

A comparação entre os resultados obtidos nos testes realizados com a crista retilínea e em labirinto comprovou, como esperado, que o uso de vertedouros labirinto gera um aumento considerável na capacidade de descarga da estrutura.

Adicionalmente, verificou-se que os principais critérios de projeto presentes na bibliografia são consistentes. Contudo, para a utilização dos ábacos que estimam os coeficientes de descarga é necessário que as dimensões do projeto se enquadrem nos limites estabelecidos por cada autor.

Partindo do método de cálculo proposto por TULLIS *et al.* (1995) desenvolveu-se uma planilha capaz de calcular as dimensões e os principais parâmetros de projeto de um vertedouro labirinto, determinando uma vazão teórica para determinada carga de projeto. O cálculo é desenvolvido a partir de dados de entrada que se referem na literatura como facilmente mensuráveis.

A partir dos resultados experimentais obtidos através da realização de testes no modelo reduzido tridimensional de vertedouros labirinto, foi possível estabelecer uma comparação representativa das quatro alternativas de *layout* da crista estudadas.

Inicialmente é possível observar as diferenças existentes entre os parâmetros obtidos através da metodologia proposta por TULLIS *et al.* (1995) e os resultados experimentais. Em todas as comparações realizadas, os coeficientes de descarga obtidos experimentalmente resultaram em valores inferiores aos apresentados pelo autor. Isso se deve principalmente aos problemas de interferência e oscilação da lâmina vertente e às condições de aproximação do escoamento, que não são facilmente quantificáveis.

Adicionalmente, devemos considerar que o parâmetro L/W de todas as estruturas avaliadas está abaixo da faixa de dimensionamento sugerida pela literatura, o que também pode contribuir para essa diferença observada. Contudo,

observa-se a necessidade de verificar a consistência dos coeficientes de descarga apresentados por TULLIS *et al.* (1995), para estruturas com α maior que 18° .

Dentre as quatro alternativas de *layout* avaliadas nos testes experimentais verifica-se um significativo aumento do coeficiente de descarga nas estruturas com menor número de ciclos, considerando um mesmo comprimento total do labirinto. Entretanto, fatores como deficiência de aeração e interferências no escoamento, que resultam em instabilidades e oscilações, também devem ser considerados na escolha da melhor alternativa.

A estrutura com três ciclos apresentou elevados coeficientes de descarga. Contudo, além requerer uma área relativamente grande para a construção do vertedouro, nessa opção foram verificadas as maiores deficiências quanto à aeração do escoamento. Levando-se em conta que a estrutura com seis ciclos apresentou coeficientes de descarga concisos e relativamente elevados, e ainda poucos problemas de aeração, verificados apenas nos cenários para H_t/P maior que 0,50, avalia-se como a melhor alternativa para o cenário em questão.

As demais opções apresentaram coeficientes de descarga inferiores aos obtidos nos testes realizados na estrutura com seis ciclos. Leva-se em conta ainda que, apesar dessas estruturas requererem menor área de implantação, a redução do coeficiente de descarga devido às características geométricas é significativa.

A comparação direta entre o projeto do caso piloto e a estrutura com 12 ciclos mostrou que os problemas de assimetria da geometria da crista do caso piloto contribuem para a redução do coeficiente de descarga principalmente para pequenas cargas, usuais em projetos de vertedouros labirinto. Nesses cenários, o comportamento da estrutura com 12 ciclos foi consideravelmente melhor.

A nova estrutura com seis ciclos, projetada sem a base na face jusante do vertedouro, aumentou significativamente a capacidade de descarga da estrutura, para valores de H_t/P menores que 0,40. Adicionalmente, os problemas relacionados à deficiência de aeração do escoamento foram solucionados e, em nenhum dos testes realizados foi verificado o estabelecimento de pressão subatmosférica no jato efluente.

Considerando a melhoria nos aspectos hidráulicos, e ainda uma provável redução de custos devido a diminuição de concreto utilizado na base do vertedouro, avalia-se a estrutura com seis ciclos com a base modificada como a melhor alternativa analisada nesta pesquisa.

O critério de projeto, representado pela planilha de dimensionamento, mostrou-se útil na função de prover opções de projeto facilmente determináveis. Caberá ao projetista a seleção da opção que melhor atender aos demais critérios hidráulicos (principalmente aeração e instabilidade) e estruturais/construtivos.

O estudo demonstrou ainda que o dimensionamento de vertedouros labirinto através de métodos presentes na literatura, apesar de estimar coeficientes de descarga com erros relativamente baixos para estruturas com todos os parâmetros dentro das faixas de dimensionamento propostas, não leva em conta os fatores relacionados aos problemas de escoamento específicos de cada projeto.

Ressalta-se a necessidade de serem analisados em futuros trabalhos os aspectos construtivos em relação a esta estrutura, e verificados possíveis problemas de erosão a jusante do vertedouro causados pelo impacto do jato efluente diretamente sobre o leito do rio.

7 CAPÍTULO VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFSHAR, A. The Development of Labyrinth Spillway Design. **Water Power and Dam Construction**, v. 40(5), p.36-39, 1988.

CASSIDY, J. J. GARDNER, C. A.; PEACOCK, R. T. Boardman Labyrinth - Crest Spillway. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.111(3), p.398-416, 1985.

DARVAS, L. A. Discussion of “Performance and Design of Labyrinth Weirs” by Hay and Taylor. **Journal of the Hydraulics Division**, v.97(HY8), p.1246-1251, 1971.

EMIROGLU, M. E.; BAYLAR, A. Influence of Included Angle and Sill Slope on Air Entrainment of Triangular Planform Labyrinth Weirs. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.131(3), p.184-189, 2005.

UNITED STATE BUREAU OF RECLAMATION. **Design of Small Dams**. Denver: Bureau of Reclamation, 1965. 611p.

FALVEY, H. T. **Hydraulic Design of Labyrinth Weirs**. Reston: ASCE Press, 2003, 162p.

HAY, N.; TAYLOR, G. Performance and Design of Labyrinth Weirs. **Journal of the Hydraulics Division**, v.96(HY11), p.2337-2357, 1970.

INDLEOKOFER, H.; ROUVÉ, G. Discharge over Polygonal Weirs. **Journal of the Hydraulics Division**, v.101(HY3), p.385-401, 1975.

LOPES, R.; MATOS, J.; MELO, J.F. Capacidade de Vazão de Descarregadores com Soleira em Labirinto. In: VIII CONGRESSO DA ÁGUA, 2006a, Figueira da Foz, Portugal.

LOPES, R.; MATOS, J.; MELO, J.F. Dissipação de Energia do Escoamento em Soleiras Descarregadoras em Labirinto. In: XXII CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, 2006b, Ciudad Guayana, Venezuela.

LUX, F. Design and Application of Labyrinth Weirs. In: DESIGN OF HYDRAULIC STATIONS, Albert e Kia Edition, p.205-2515. 1989.

LUX, F.; HINCHLIFF, D. L. Design an Construction of Labyrinth Spillways. In: 15th CONGRESS ICOLD, VOL. IV, p. 249-274, 1985, Lausanne, Suíça.

MAGALHÃES, A. P. Descarregadores em Labirinto. **Laboratório Nacional de Engenharia Civil**, Memória nº. 605, 1983, 16p.

MAGALHÃES, A. P.; LORENA, M. Hydraulic Design of Labyrinth Weirs. **Laboratório Nacional de Engenharia Civil**, Memória nº. 736, 1989, 10p.

MELO, J. F.; RAMOS, C. M.; MAGALHÃES, A. P. Descarregadores com Soleira em Labirinto de um Ciclo em Canais Convergentes. In: VI CONGRESSO DA ÁGUA, 2002, Porto, Portugal.

PAXSON, G.; SAVAGE, B. Labyrinth Spillways: Comparison of Two Popular U.S.A. Design Methods and Consideration of Non-Standard Approach Conditions and Geometries. In: HYDRAULIC MODEL REPORT Nº CH61/06, Proc. of the International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Stations, p.47-55, 2006, Montemor-o-Novo, Portugal.

TULLIS, J. P.; NOSRATOLLAH, A.; WALDRON, D. Design of Labyrinth Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v.121(3), p.247-255, 1995.

TULLIS, B. P.; WILMORE, C. M.; WOLFHOPE, J. S. Improve Performance of Low Head Labyrinth Weirs. In: WORLD WATER AND ENVIRONMENTAL RESOURCES CONGRESS 2005: IMPACTS OF GLOBAL CLIMATE CHANGE, 2005, Anchorage, Estados Unidos.

TULLIS, B. P.; YOUNG, J. C.; CHANDLER, M. A. Head-Discharge Relationships for Submerged Labyrinth Weirs. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.133(3), p.248-254, 2007.

TULLIS, B. P.; WILMORE, C. M.; WOLFHOPE, J. S. Labyrinth Weirs. In: 2nd IJERW ON HYDRAULIC STATIONS, 2008, Pisa, Itália.

YILDIZ, D.; ÜZÜCEK, E. Modeling the Performance of Labyrinth Spillways. **The International Journal of Hydropower and Dams**, n.3, p.71-76, 1996.

WORMLEATON, P. R., SOUFIANI, E. Aeration Performance of Triangular Planform Labyrinth Weirs. **Journal of Environmental Engineering**, ASCE, v.124(8), p.709-719, 1998.

WORMLEATON, P. R., TSANG, C. C. Aeration Performance of Rectangular Planform Labyrinth Weirs. **Journal of Environmental Engineering**, ASCE, v.126(5), p.456-465, 2000.